

Р. Н. ШЕСТОВ

Гидро- циклоны

Депозит - 2062



ИЗДАТЕЛЬСТВО „МАШИНОСТРОЕНИЕ“
ЛЕНИНГРАД 1967

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Общие сведения о гидроциклонах	5
1. Современные методы разделения суспензий и область применения гидроциклонов	—
2. Принцип действия гидроциклонов и отличие их от аэроциклонов и центрифуг	9
3. Конструкция гидроциклонов	11
Глава II. Гидродинамические основы и закономерности моделирования гидроциклонов	21
4. Движение жидкости в гидроциклонах и распределение скоростей	—
5. Движение сепарируемой частицы в гидроциклоне	31
6. О воздушном столбе в гидроциклоне	32
7. Закономерности моделирования гидроциклонов	36
Глава III. Основные факторы, влияющие на производительность и процесс разделения фаз в гидроциклонах	38
8. Факторы, влияющие на процесс разделения фаз в гидроциклонах	—
9. Характеристика процесса разделения фаз в гидроциклонах	39
10. Давление и равномерность подачи питания	41
11. Диаметр гидроциклона и высота его цилиндрической части	44
12. Конструкция верхней разгрузочной части	45
13. Форма и размеры входного отверстия	47
14. Диаметры верхнего и нижнего отводных отверстий	50
15. Угол конической части	52
Глава IV. Расчет гидроциклонов	53
16. Определение производительности гидроциклона	—
17. Методика расчета основных размеров гидроциклона	58
Глава V. Эксплуатация гидроциклонов	62
18. Монтаж и наладка гидроциклонов	—
19. Контроль и регулирование работы гидроциклонов	64
20. Расход электроэнергии	66
Глава VI. Опыт применения гидроциклонов и перспективы их использования в пищевой промышленности	67
21. Промышленная установка гидроциклонов для отделения жира из отработанной воды	—
22. Гидроциклоны в производстве костного клея	71
23. Перспективы применения гидроциклонов в других отраслях мясо-молочной и пищевой промышленности	72
Литература	78

В брошюре рассмотрены основы теории, расчет и конструкции гидроциклонов. Приведены зависимости и соотношения основных размеров. Указаны области применения гидроциклонов при выщелачивании, осаждении и полимеризации, для сгущения тонких осадков гидрата окиси алюминия, цинковой и свинцовой пыли, обогащения углей и руд многих металлов. Освещен опыт работы гидроциклонов для отделения жира от воды в промышленных условиях и обезжиривания кости при производстве костного клея. Рассмотрены перспективы использования гидроциклонов в других областях пищевой промышленности.

Брошюра предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами конструирования и эксплуатации гидроциклонов; она также может быть использована студентами вузов соответствующих специальностей.

0616075

БИБЛИОТЕКА
Уральского Политехнического института
им. С. М. Кирова

Рецензент инж. П. П. Храмчихин

3—17—3
197—67

Ростислав Николаевич Шестов

ГИДРОЦИКЛОНЫ

Редактор издательства Н. З. Симоновский
Технический редактор В. Ф. Павлова
Обложка художника Б. Л. Жаdanовского

Корректор Р. М. Беликова

Сдано в производство 18/X 1966 г. Подписано к печати 23/XII 1966 г. М-19451
Формат бумаги 60 × 90^{1/16} Бумага типографская № 2 Печ. листов 5
Уч. изд. листов 5 Тираж 3000 экз. Заказ № 1280 Цена 25 коп.

Ленинградское отделение издательства «Машиностроение»
Ленинград, Д-65, ул. Дзержинского, 10

Ленинградская типография № 6 Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР
Ленинград, ул. Моисеенко, 10

ПРЕДИСЛОВИЕ

В директивах XXIII съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1966—1970 гг. указано, что главная экономическая задача состоит в том, чтобы на основе всемерного использования достижений науки и техники обеспечить дальнейший значительный рост промышленности и повышение производительности труда.

Необходимо ускорить научно-технический прогресс на основе широкого развития научных исследований и быстрого использования их результатов в производстве.

В нашей стране за последние годы развернута большая работа по созданию прогрессивных конструкций машин и внедрению их в производство. К такому оборудованию относятся гидроциклоны, получившие распространение в угольной, металлургической, химической, бумажной, пищевой и других отраслях промышленности.

Гидроциклоны являются наиболее простыми по конструкции и дешевыми аппаратами, использующими действие центробежной силы. Они компактны, обладают высокой производительностью и несложны в эксплуатации.

Впервые гидроциклоны были применены в 1939 г. для сгущения лессовой суспензии, которая использовалась в качестве среды для обогащения угля.

В металлургической промышленности гидроциклоны применяются для отделения окалины, попадающей в воду, охлаждающей внутренние поверхности прокатных станов.

В химической промышленности с помощью гидроциклонов отделяют промежуточные продукты или отходы в виде суспензии, например при выщелачивании, осаждении, кристаллизации — в неорганической химии или полимеризации и конденсации — в органической химии, для предварительного сгущения тонких осадков гидрата окиси алюминия, цинковой и свинцовой пыли и др.

Гидроциклоны диаметром меньше 25 мм нашли применение в гомогенных атомных реакторах для удаления твердых нерастворимых продуктов деления и коррозии из горючего и теплоносителя. В условиях высоких температур и давлений гидроциклон незаменим, так как не имеет подвижных частей и уплотнений.

Это свидетельствует о возможности применения гидроциклонов для удаления взвесей из замкнутых систем высоких давлений и температур в энергетических установках.

Гидроциклоны целесообразно применять для осветления производственных сточных и транспортно-моечных вод, так как при этом резко сокращаются размеры отстойников (или они совсем отсутствуют), а также необходимое производству количество воды.

В последние годы гидроциклоны стали применять в пищевой промышленности. При производстве крахмала необходимо разделять слипшиеся частицы крахмала и клейковины, что очень хорошо достигается в поле срезающих усилий гидроциклона. Кроме того, при помощи гидроциклонов производится предварительная очистка от песка и промывка крахмального молока. И, наконец, для очистки известкового молока от песка и отделения твердой фазы от сока второй сатурации в сахарном производстве применение гидроциклонов также дало положительные результаты.

В мясной промышленности гидроциклоны в основном применяются для обезжиривания рабочей воды, уходящей в канализацию, и отделения кусочков кости при производстве пищевых жиров.

Вопросы теории и практики работы гидроциклонов были опубликованы в большом числе журнальных статей. Однако эти сведения (ввиду их разрозненности) не дают достаточно полного представления о гидроциклонах.

Первой обобщающей работой была книга М. Г. Акопова и В. И. Классена, изданная в 1960 г., касающаяся вопросов применения гидроциклонов при обогащении углей.

В 1961 г. вышла книга А. И. Поварова по вопросам теории и практики гидроциклонов при обогащении руд, а в 1964 г. — брошюра Ч. К. Курочицкого и Н. С. Шипуновой, в которой освещен опыт применения гидроциклонов в крахмало-паточной промышленности и методика их расчета.

В настоящей брошюре на основании данных исследований автора рассматриваются основы теории, расчета и конструкции гидроциклонов для отделения более легкой фазы от воды, в частности жира.

Автор

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГИДРОЦИКЛОНАХ

1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОЦИКЛОНОВ

В различных отраслях промышленности наряду с перемешиванием и диспергированием к числу рабочих процессов, протекающих в системах твердое тело—жидкость и жидкость—жидкость, относятся разделение, сгущение и обезвоживание.

Неоднородные жидкие системы с более или менее грубым раздроблением дисперсной фазы поддаются разделению под действием одной силы тяжести. Если плотность дисперсной фазы больше плотности дисперсионной среды, взвешенные частицы оседают на дно сосуда, и, наоборот, если плотность дисперсионной среды больше плотности взвешенных частиц, последние всплывают вверх. Осаждение под действием силы тяжести твердых частиц, находящихся во взвешенном состоянии в жидкой среде, называется отстаиванием (сгущением, седиментацией). Практически методом отстаивания пользуются главным образом для разделения грубых суспензий.

В тех случаях, когда при разделении суспензий недопустимы потери жидкости с осадком или взвешенные твердые частицы весьма плохо оседают, или необходимо выделить твердую фазу в виде осадка с некоторым минимальным содержанием влаги, метод отстаивания неприменим. В этих случаях суспензии разделяют фильтрацией.

Фильтрация как универсальный метод разделения суспензий находит в настоящее время широкое применение в технике, начиная от самых грубых суспензий и кончая тонкими мутями.

Известно, что при перемещении тела в жидкой среде последняя оказывает сопротивление, которое складывается из сопротивления от инерции среды (динамическое) и сопротивления от трения (вязкости). При небольшой скорости перемещения и малых размерах тела или его обтекаемой поверхности преобладает сопротивление от трения.

Скорость осаждения шарообразных частиц диаметром менее 0,175 мм в зависимости от вязкости среды определяется по формуле Стокса

$$w_{oc} = \frac{d^2 (Q_1 - Q_2) g}{18\mu} \text{ см/сек.} \quad (1)$$

Для частиц диаметром 1,5—15 мм скорость осаждения определяется по формуле Риттингера

$$w_{oc} = \sqrt{\frac{2d (Q_1 - Q_2) g}{Q_2}} \text{ см/сек.} \quad (2)$$

Скорость осаждения частиц диаметром 0,175—1,5 мм можно определить по формуле Аллена

$$w_{oc} = \left(\frac{4g}{30Q_2 \sqrt{\nu}} \right)^{\frac{2}{3}} d (Q_1 - Q_2)^{\frac{2}{3}} \text{ см/сек.} \quad (3)$$

Здесь d — диаметр падающей частицы в см;
 Q_1 и Q_2 — плотность частицы и среды в г/см³;
 $g = 9,81$ — ускорение силы тяжести в см/сек²;
 μ — коэффициент вязкости в г/см·сек;
 ν — коэффициент кинематической вязкости в см²/сек.

Из уравнений (1), (2) и (3) следует, что скорость осаждения по закону Стокса пропорциональна d^2 ; по закону Аллена — d ; по закону Риттингера — $\sqrt{d}$.

Поскольку с уменьшением размера частиц их объем уменьшается быстрее, чем полная поверхность, а силы сопротивления пропорциональны полной поверхности, то действие объемных сил будет сравнительно невелико, а поэтому и абсолютная скорость перемещения мелких зерен в воде под действием сил тяжести будет небольшой.

Одновременно с преимущественным влиянием поверхностных сил при движении частиц в жидкости под влиянием поля тяготения весьма существенной является разность плотностей среды и частиц. При незначительной разности плотностей и небольших размеров частиц абсолютные скорости их будут ничтожно малыми, т. е. практически процесс отстаивания в поле сил тяжести будет неэффективен.

Из изложенного видно, что увеличение скорости отстаивания (всплывания) можно достигнуть: увеличением размера частиц; увеличением разницы между плотностями частиц и среды; уменьшением вязкости и среды и увеличением ускорения.

Первых три пути увеличения скорости отстаивания в производственных условиях практически неприменимы. Улучшение и интенсификация процесса отстаивания могут быть достигнуты только увеличением ускорения, т. е. применением центробежного эффекта.

В этом случае при соответствующих условиях получаемые ускорения могут превосходить в сотни раз ускорение силы тяжести.

В промышленности этот принцип уже давно используется для разделения жидкостей, имеющих различные плотности, или для выделения мелких нерастворимых частиц при помощи различных центрифуг.

Промышленные способы centrifугирования суспензий следует относить к одному из следующих процессов: центрифугальному осветлению; отстойному centrifугированию и центробежной фильтрации.

Центрифугальное осветление — это процесс удаления из жидкости загрязнений (в небольших количествах), осуществляемый в сплошных роторах центрифуг. Этот процесс применяется главным образом при обработке тонких и коллоидных суспензий, поэтому для его осуществления необходимо создание мощного центробежного поля.

Центрифугальное осветление является простейшим процессом centrifугирования. С физической точки зрения его можно рассматривать как свободное движение частиц твердой фазы под действием центробежного поля.

Отстойное (или осадительное) centrifугирование — этот процесс разделения суспензий со значительным содержанием твердой фазы, осуществляемый в сплошных роторах центрифуг.

В общем случае отстойное centrifугирование состоит из двух физических процессов: осаждения твердой фазы, протекающего по гидродинамическим законам сопротивления среды движению находящегося в нем тела и уплотнения осадка, происходящего по законам механики дисперсных систем.

Центробежная фильтрация — это процесс разделения суспензий путем centrifугирования их в дырчатых роторах центрифуг.

С физической точки зрения центробежная фильтрация складывается из следующих процессов: удаления жидкости через дисперсный осадок; уплотнения осадка и удаления из него жидкости.

Центробежная фильтрация наиболее эффективна, когда необходимо получить продукт с наименьшей влажностью или когда требуется промывка осадка.

Все вышеперечисленные способы применения центробежного эффекта требуют создания высокооборотных с высокими прочностными характеристиками машин из-за больших динамических напряжений в ответственных частях, а также специального привода.

Наиболее простыми по конструкции и дешевыми аппаратами, использующими действие центробежной силы, являются гидроциклоны.

В отличие от сгустителей и осветлителей, работающих по принципу действия силы тяжести и производящих сепарацию

практически в спокойной среде, гидроциклон действует, как пропорциональный разделитель. Поэтому осветленная жидкая фаза содержит определенное количество твердого продукта и не может быть чистой.

Задача получения возможно более чистого верхнего продукта находится в противоречии с требованием получить возможно более густой нижний продукт. Однако при двуступенчатом последовательном соединении гидроциклонов можно удовлетворить одновременно обоим требованиям.

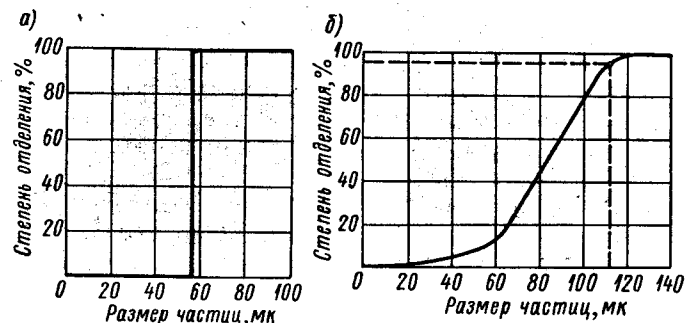


Рис. 1. Зависимость степени разделения в гидроциклонах от размера частиц (по Травинскому)

Абсолютного разделения в гидроциклонах достичь невозможно (рис. 1, а). Все сепараторы, работающие по поточному принципу, имеют S-образную характеристику, аналогичную характеристике гидроциклона (рис. 1, б). Диаграмма на этом рисунке построена для гидроциклона диаметром 350 мм, давлением питания 1,5 кг/см² при отделении кварцевого песка 112 мкм. Степень отделения 95% [15].

Указанный недостаток не является препятствием для внедрения гидроциклонов в промышленность. Особенно целесообразно использовать гидроциклоны в сочетании с другими аппаратами. Например, процесс промывки может быть осуществлен при помощи гидроциклонов, а сгущение (крахмал, пластмассы) — при помощи центрифуг или сепарация — гидроциклонами, а обезвоживание (мел) — центрифугами [15]. Гидроциклоны применяются для предварительного сгущения суспензии (соль), поступающей на центрифуги.

Эффективна совместная работа гидроциклонов — предварительных сгустителей и барабанных фильтров — для обезвоживания подобно совместной работе центрифуг и сушилок, когда центрифуги используются для предварительного обезвоживания материалов перед тепловой сушкой.

В соответствии с размерами ячеек сит фильтрующие центрифуги могут применяться для отделения твердых частиц с мини-

мальным размером (60—100 мкм). Преимущество гидроциклонов состоит в том, что они могут отделять частицы размером до 5 мкм. Однако на центрифугах достигаемое сгущение суспензии может значительно превзойти предел ее текучести. Центрифуги обезвоживают многие материалы до остаточного содержания влаги в несколько процентов. Этим определяется принципиальное различие применения гидроциклонов и центрифуг: обезвоживание — в центрифугах и непрерывное разделение — в гидроциклонах. Если достаточно сгущение в пределах текучести материала, то при больших объемах обрабатываемого продукта гидроциклоны вследствие большей надежности их конструкции (нет вращающихся частей) имеют преимущества перед центрифугами.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГИДРОЦИКЛОНОВ И ОТЛИЧИЕ ИХ ОТ АЭРОЦИКЛОНОВ И ЦЕНТРИФУГ

Гидроциклон (рис. 2) представляет собой аппарат, состоящий из цилиндрической части 1, к которой снизу примыкает широким основанием коническая часть 7, а сверху крепится промежуточная сливная камера 3 с патрубком 2 для отвода верхнего продукта. Между цилиндрической частью и сливной камерой устанавливается диафрагма 4 с патрубком 6, а в нижней части конуса закрепляются сменные насадки 8. Движущихся частей в гидроциклоне нет.

Обычно гидроциклон устанавливают вертикально (вершиной конуса вниз), но он может быть также установлен и горизонтально или наклонно.

Исходная смесь поступает под давлением через входной патрубок 5 тангенциально в верхнюю часть цилиндра и приобретает круговое движение. При этом возникают значительные центробежные силы, превышающие в десятки и сотни раз силу тяжести, под действием которых более тяжелая фаза движется от оси гидроциклона к его стенкам по спиральной траектории вниз и через нижнюю насадку выбрасывается из гидроциклона. Более легкая фаза движется во внутреннем спиральном

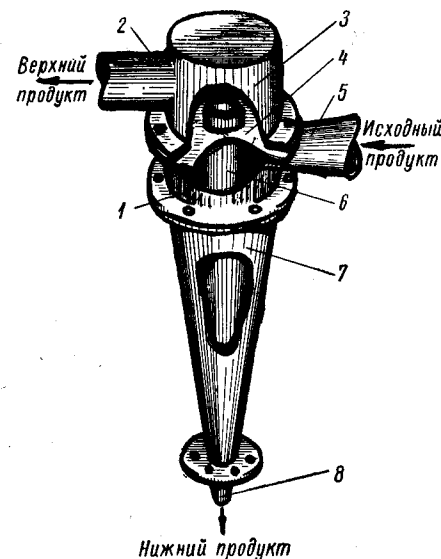


Рис. 2. Общий вид гидроциклона

потоке, направленном вверх, и выбрасывается из гидроциклона через патрубок для отвода верхнего продукта.

Вдоль оси гидроциклона образуется воздушный столб, имеющий важное значение для разделяющего действия гидроциклона.

При создании гидроциклона образцом служил аэроциклон, применяемый уже долгое время в качестве пылеуловителя. Логично было бы применить принцип аэроциклона и для обработки суспензий. Однако существенное различие между аэроциклоном и гидроциклоном основано на разных физических свойствах движущихся через них потоков, а именно: твердые частицы суспензии удерживаются в ней значительно сильнее, чем в газах. Это объясняется влиянием плотности среды, которое учитывается отноше-

нием $\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2}$, где ρ_1 — плотность частицы, ρ_2 — плотность среды. Это отношение для систем газ — твердое тело примерно в 30 раз больше, чем отношение для систем твердое тело — жидкость. Оно входит в качестве множителя в формулы осаждения Стокса и Ньютона. Кинематическая вязкость оказывает влияние в обратном направлении, причем для газов примерно в 10 раз меньше, чем для жидкостей. Вследствие того, что твердые частицы в жидкости удерживаются сильнее, а также ввиду несжимаемости жидкости изменение размеров и положения отводных патрубков влияет на движение твердых частиц в гидроциклоне больше, чем в аэроциклоне.

Отличие гидроциклона от аэроциклона состоит также в том, что в аэроциклоне среда, т. е. воздух, практически не находится под действием сил тяжести.

От центрифуги гидроциклон отличается прежде всего способом, которым приводится суспензия во вращение.

В центрифуге суспензия вращается вместе с барабаном при постоянной угловой скорости и не движется или незначительно движется относительно барабана; при этом на нее не действуют никакие касательные силы.

Ускорение a центробежного движения в центрифуге тем больше, чем больше окружная скорость v_t .

Характер движения жидкости в гидроциклоне определяется скоростью жидкости в тангенциально расположенном питающем патрубке.

На взвешенные частицы действуют достаточно большие тангенциальные силы, поддерживающие их в непрерывном относительном движении.

Окружная скорость v_t жидкости меняется, повышаясь с уменьшением радиуса r конической части гидроциклона.

Для жидкости без учета трения

$$v_t r = \text{const.} \quad (4)$$

Для вязких жидкостей можно принять для определения составляющих скоростей следующий закон изменения:

$$v_t r^n = \text{const}, \quad (5)$$

где $n < 1$ — показатель степени.

При таком законе скорости на поверхности внутренней стенки гидроциклона будут меньше идеальной, однако они не будут равны нулю, что, естественно, противоречит обычно применяемым положениям в теории течения вязких жидкостей.

Радиальное ускорение a_r , которое имеет очень важное значение для разделения, определяется по уравнению

$$a_r = \frac{v_t^2}{r}. \quad (6)$$

Из уравнения (4) имеем

$$v_t = \frac{\Gamma}{2\pi r},$$

тогда

$$a_r = \frac{\Gamma^2}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{r^3}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что ускорение сильно возрастает с уменьшением радиуса вращения. Поэтому корпус гидроциклона имеет сужение от входа к выходу: при такой форме достигается увеличение центробежного ускорения. Такую же форму имеют центрифуги с увеличивающимся радиусом корзины, например фильтрующие центрифуги со шнековой выгрузкой.

3. КОНСТРУКЦИЯ ГИДРОЦИКЛОНОВ

По конструктивным особенностям все гидроциклоны можно разделить на следующие группы.

К о н и ч е с к и е, получившие наибольшее распространение в промышленности и отличающиеся:

числом выдаваемых продуктов (два или три);

способом установки (вертикальные, горизонтальные и наклонные);

конструкцией верхней разгрузочной части, когда верхний продукт отводится из цилиндрической части гидроциклона непосредственно через отводной патрубок или через промежуточную сливную камеру. Иногда глубина погружения отводного патрубка в цилиндрическую часть плавно регулируется (бывают также гидроциклоны с открытым верхом);

способом установки и конструкцией питающего патрубка;

конусностью ($\alpha = 5 \div 90^\circ$);

относительной высотой цилиндрической части (от 0,2 до 4,0 диаметров гидроциклона);

конструкцией нижних насадок;
материалами, из которых изготавливается гидроциклон, или футеровкой внутренней поверхности;
способом регулировки работы гидроциклона (ручной или автоматической);

способом отвода верхнего и нижнего продуктов (под уровень отводимых продуктов или свободный).

Батареи, отличающиеся числом элементарных циклонов в батарее, конструкцией, размером и компоновкой, способами питания и отвода продуктов.

Трехпродуктовые, отличающиеся от конических тем, что они имеют две промежуточные камеры и два отводных патрубка для отвода верхнего продукта.

Цилиндрические состоят из двух гидроциклонов: основного — цилиндрического и перечистного — конического.

Винтовые, отличающиеся конструкцией направляющего устройства.

Турбоциклоны (центриклоны), отличающиеся от обычных гидроциклонов наличием турбины, установленной внутри аппарата, а также конструкцией турбины и способом отвода продуктов.

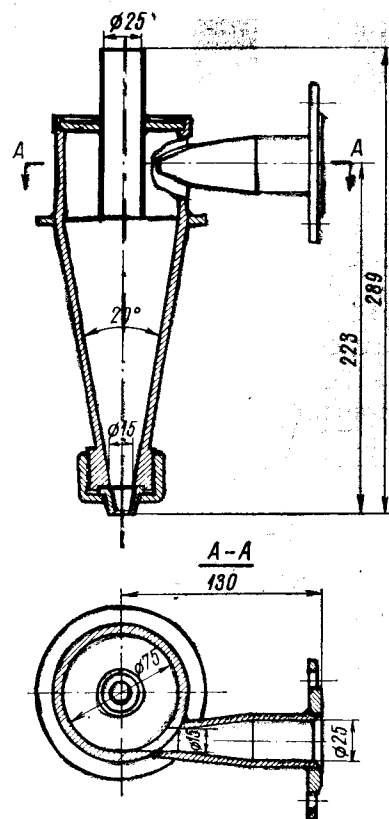


Рис. 3. Конический гидроциклон с отводом верхнего продукта непосредственно через отводной патрубок

Конические гидроциклоны

Наиболее широкое практическое применение нашли конические двухпродуктовые гидроциклоны.

На рис. 3 представлен конический гидроциклон с отводом верхнего продукта непосредственно через отводной патрубок, используемый для отделения мелких кусочков кости от жироводной смеси при производстве пищевых жиров.

Конструкция гидроциклона, разработанная для автоматизированного жирового цеха Ленмясокомбината им. С. М. Кирова, представлена на рис. 4. Этот гидроциклон применяется для отделения костного жира от воды с отводом верхнего продукта через промежуточную камеру и погружением конца отводной трубы

под уровень продукта. Он состоит из цилиндра 6, к нижней части которого приваривается конус 7, а к верхней части с помощью фланцев крепится промежуточная камера 3 с тангенциально расположенным патрубком 4 для отвода верхнего продукта. Патрубок 2 для ввода питания приваривается к верхней части цилиндра по касательной для обеспечения безударного входа исходного продукта. Внутри цилиндра устанавливается сменная диафрагма 5, а в вершине конуса с помощью специальной гайки 8 закрепляется сменная

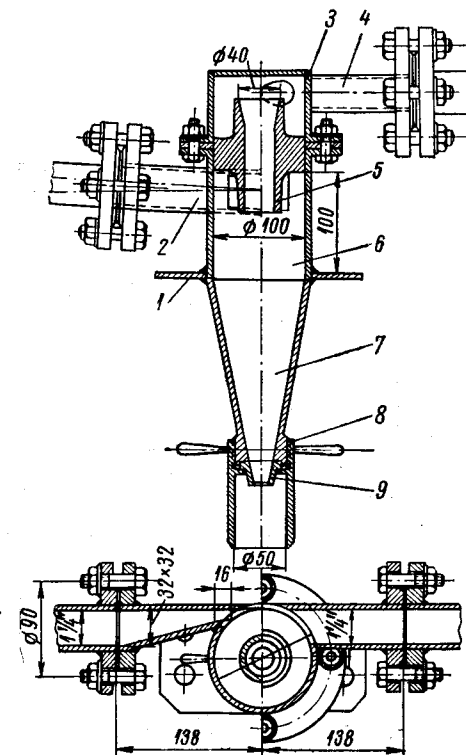


Рис. 4. Конический гидроциклон с отводом верхнего продукта через промежуточную камеру

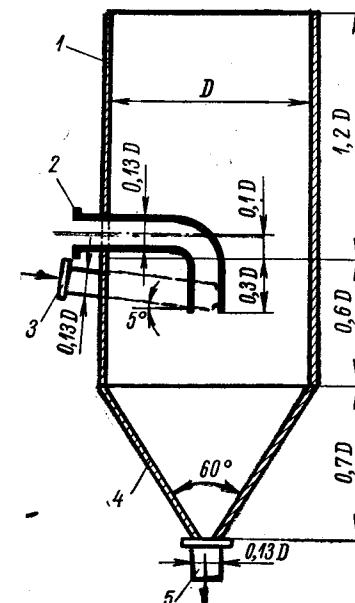


Рис. 5. Гидроциклон с открытым верхом

нижняя насадка 9. Установка гидроциклона осуществляется при помощи плиты 1, приваренной к цилиндрической части.

Гидроциклон с открытым верхом конструкции Дальстрёма (рис. 5) состоит из цилиндрической части 1 с открытым верхом и конической части 4 с разгрузочной насадкой 5. Входной патрубок 3 встроен тангенциально в цилиндрическую часть под углом 5°. Труба 2 для отвода более легкого продукта расположена в цилиндрической части и выводится коленом наружу.

Изготавливают также гидроциклоны с открытым верхом, у которых входной патрубок присоединен к конической части, или

гидроциклоны, не имеющие специальной отводной трубки. В этом случае верхний продукт удаляется через сливной порог. Гидроциклоны с открытым верхом работают при очень низких давлениях и применяются для разделения мелкозернистого материала при классификации по крупности.

Ниже рассматриваются конструктивные решения отдельных узлов и деталей гидроциклонов.

Корпус гидроциклона изготавливается чаще литым, иногда сварным или вытачивается из металла. Корпуса небольших гидроциклонов (диаметром 300—350 мм) отливают целиком, а корпуса гидроциклонов больших размеров — из отдельных секций, фланцы

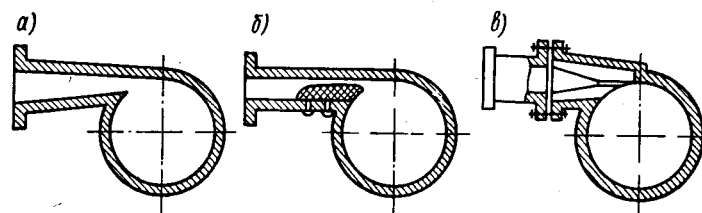


Рис. 6. Конструкции питающих патрубков

которых соединяют болтами. Преимуществами литых гидроциклонов перед сварными являются возможность изготовления литья из износостойких материалов, простота изготовления и более долгий срок службы (особенно при отливке их из легированного никелем чугуна).

Для уменьшения износа внутреннюю поверхность корпуса гидроциклона футеруют резиной или каменным литьем.

Входной патрубок должен устанавливаться по касательной к стенке гидроциклона. В литых конструкциях входной патрубок отливается как одно целое с цилиндрической частью корпуса. Для увеличения начальной скорости струи его делают сужающимся. Часто гидроциклон изготавливают с регулируемым входным отверстием прямоугольного или круглого сечения (рис. 6, а).

В циклонах Уфимского завода горного оборудования предусматривается возможность изменения сечения отверстия питания посредством установки сменных вставок (рис. 6, б и в).

Нижние насадки служат для отвода более тяжелой фазы. Их изготавливают в виде сменных конических насадок (рис. 7, а) с различными выходными отверстиями или в виде резиновых затворов.

Крепление насадок может осуществляться различными способами. В большинстве случаев насадка прижимается фланцем или гайкой к нижней части гидроциклона. При таком способе крепления для смены насадки нужно остановить гидроциклон. Для смены насадок на ходу в некоторых конструкциях гидроциклонов преду-

сматриваются обоймы, в которые вкладываются насадки с различными отводными отверстиями (рис. 7, б). Передвижные обоймы позволяют быстро и без остановки гидроциклона сменить насадку.

Резиновые насадки в затворах отличаются конструкцией и способом сжатия. Насадки, представляющие собой втулки из эластич-

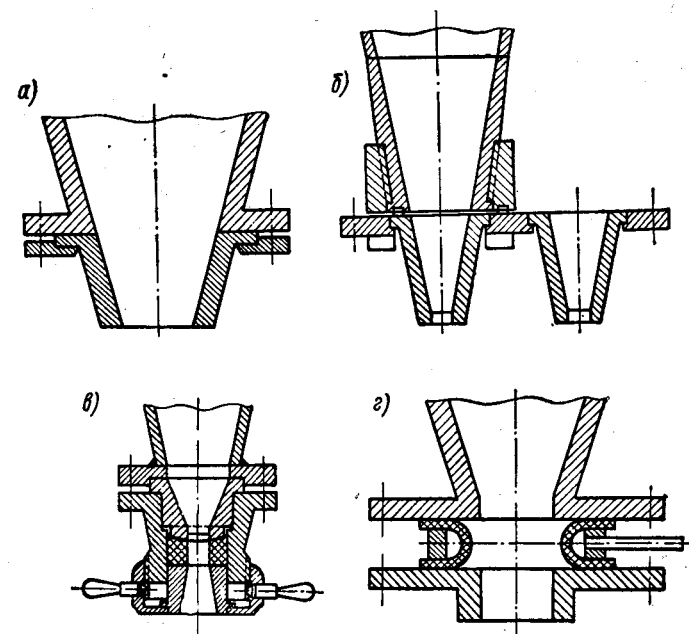


Рис. 7. Конструкции насадок

ной резины, могут быть сжаты в продольном направлении при помощи гайки (рис. 7, в).

Насадка в виде резиновой манжеты (рис. 7, г) сжимается сжатым воздухом, подаваемым от компрессора. Наибольшее давление, требуемое для работы насадки, 4—6 кг/см². Такого типа затворы применяются для автоматического регулирования гидроциклона.

Батарейные гидроциклоны

Размер гидроциклонов принято характеризовать диаметром их цилиндрической части. Гидроциклоны изготавливаются различных диаметров от 10 до 500 мм и более. Самыми распространенными являются гидроциклоны диаметром 100—500 мм. В ряде случаев предпочтительно применение гидроциклонов меньшего диаметра, так как при этом значительно повышается эффективность разделения.

В таких случаях устанавливается несколько гидроциклонов, образующих одну батарею, которая питается от общей подводной трубы. Такой аппарат называется батарейным гидроциклоном. Если соединение осуществляется в одном корпусе, такой аппарат называется мультициклоном. Отдельные гидроциклоны, составляющие мультициклон, называются микроциклонами.

Батарейные гидроциклоны и мультициклоны отличаются числом микроциклонов, размером, способами соединения, питанием и отводом продуктов.

На рис. 8 показан микроциклон диаметром 20 мм, разработанный опытным конструкторским бюро Центрального научно-исследовательского института крахмало-паточной промышленности. Он состоит из корпуса 3, крышки 4, верхней насадки 5 и нижней насадки 2. Корпус и крышка изготовлены из пластмассы, верхняя и нижняя насадки — из бронзы. Входное сопло 1 образуется канавкой в крышке и торцевой плоскостью верхней части корпуса. Крепление микроциклона осуществляется при помощи резьбы на нижней насадке и специального посадочного пояса на верхней насадке.

На рис. 9 представлен мультициклон, внутри корпуса которого размещено восемь микроциклонов диаметром 20 мм.

Мультициклон состоит из цилиндрического корпуса 3, разделенного двумя перегородками 5 и 6 на три камеры. В перегородке 6 имеется проем, закрытый заглушкой 2, через который возможен доступ во внутреннюю напорную камеру мультициклона 4. При сборке микроциклоны через этот проем вводятся в пространство между перегородками, вставляются в предназначенные для них отверстия и закрепляются нижней насадкой, имеющей резьбу на внешней цилиндрической поверхности. После того как все микроциклоны вставлены и закреплены, ставится на место заглушка 2 и закрывается торцевая крышка 1. На этом сборка мультициклона заканчивается.

Мультициклоны подобного типа применяются при производстве крахмала [10].

В 1964 г. на Ленинградском клеевом заводе были проведены испытания мультициклона (рис. 9) для отделения жира от воды при производстве костного клея гидромеханическим способом. Установка гидроциклона в линии обезжиривания кости позволила снизить количество жира в воде, уходящей в канализацию, до 0,15%.

Мультициклоны могут быть изготовлены в виде нескольких ярусов батарей, смонтированных в один общий блок.

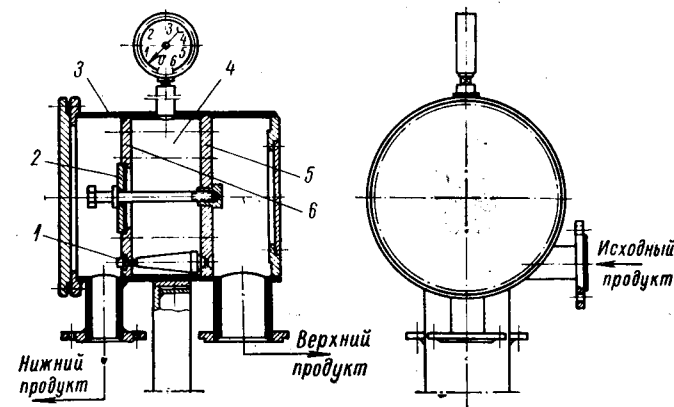


Рис. 9. Мультициклон из восьми микроциклонов диаметром 20 мм

Трехпродуктовые гидроциклоны

Трехпродуктовый конический гидроциклон (рис. 10) представляет собой аппарат с двумя промежуточными камерами и двумя отводными патрубками для отвода верхнего продукта. Из гидроциклона промежуточный продукт выходит через кольцевое пространство между отводными патрубками, а остальное количество потока — через внутренний патрубков. Более тяжелая фаза (нижний продукт) разгружается через нижнюю насадку. В трехпродуктовом гидроциклоне вследствие вращательного движения жидкости в наружном отводном патрубке более тяжелая фаза под действием центробежной силы концентрируется у внутренней его стенки, а более легкая фаза — ближе к осевой части. При этом через внутреннюю трубку выносятся наиболее легкие частицы, чем через кольцевое пространство.

На рис. 11 представлена схема трехпродуктового комбинированного гидроциклона, состоящего из наружного и внутреннего гидроциклонов.

Наружный гидроциклон, в свою очередь, состоит из верхней цилиндрической части 5 и нижней конической 7, вершина которой

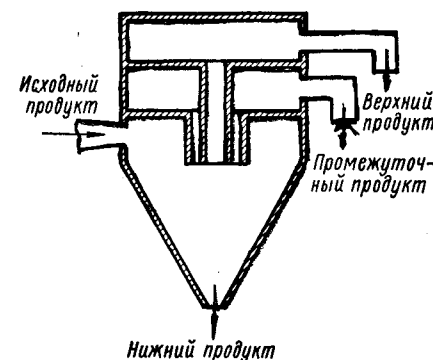


Рис. 10. Трехпродуктовый конический гидроциклон

переходит в первое отверстие для выхода нижнего продукта 1. В верхней цилиндрической части наружного гидроциклона имеется тангенциально расположенный к ней питающий патрубок 4.

Внутренний гидроциклон также состоит из верхней цилиндрической 3 и нижней конической 2 частей. В цилиндрической части внутреннего гидроциклона имеются четыре тангенциально распо-

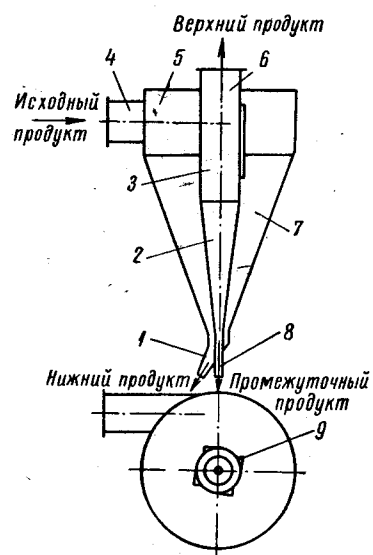


Рис. 11. Трехпродуктовый комбинированный гидроциклон

ложенных щелевых отверстий 9 для ввода обрабатываемого продукта. Вершина конической части внутреннего гидроциклона переходит во второе отводное отверстие для нижнего продукта [8]. Более легкая фаза отводится из аппарата через трубку 6. Обрабатываемый продукт поступает тангенциально в пространство между двумя гидроциклонами и приобретает вращательное движение. При этом некоторая часть тяжелой фазы под действием центробежной силы отбрасывается к стенке наружного гидроциклона и, двигаясь по периферии, выходит через первое отводное отверстие. Во внутренний гидроциклон поступает через щелевые отверстия более легкая фаза продукта. При тангенциальном вводе легкая фаза приобретает также вращательное движение и

в поле центробежных сил проходит вторичное разделение.

На практике трехпродуктовые гидроциклоны применяются не столько для разделения исходного материала на три продукта, сколько для дополнительной регулировки точности разделения обрабатываемого материала на два продукта.

Трехпродуктовый гидроциклон позволяет регулировать качество двух конечных продуктов разделения путем изменения выхода промежуточного продукта, который в виде циркулирующей нагрузки может быть возвращен в гидроциклон.

Турбоциклоны (центриклоны)

По принципу действия турбоциклон является комбинацией гидроциклона и центрифуги. Необходимый для работы напор создается не насосом, как в гидроциклонах, а турбинкой, расположенной в цилиндрической части аппарата (рис. 12). Турбоциклоны отличаются конструкцией турбинки, способом питания и отбором продуктов разделения. На рис. 12, б, в, г показаны различные типы турбинок.

Нижний продукт удаляется, как и обычно, через нижнее отводное отверстие, а верхний продукт — через центральную трубу, проходящую вдоль оси аппарата (рис. 12, а), или через полый вал турбинки и промежуточную камеру (рис. 13). Диаметр нижнего отводного отверстия можно регулировать сжатым воздухом с помощью резинового кольца.

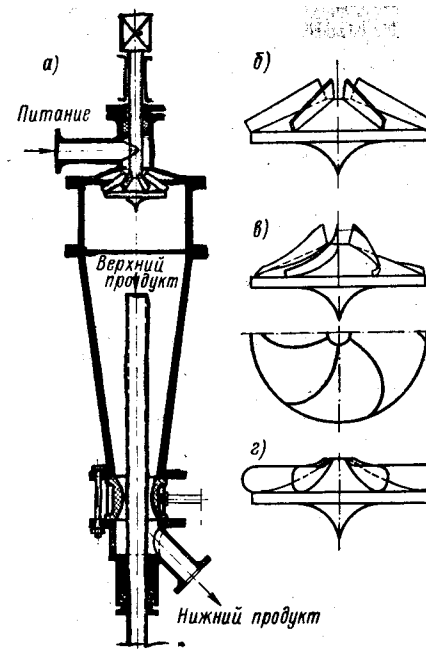


Рис. 12. Турбоциклон с автоматическим регулированием

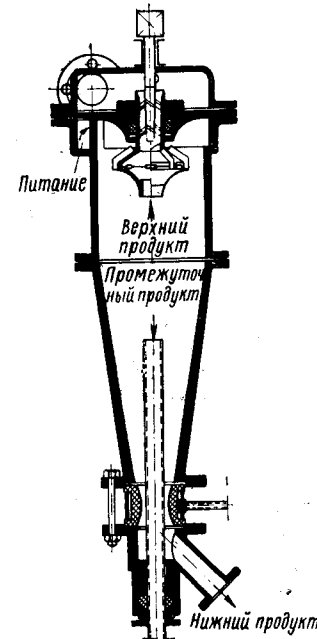


Рис. 13. Трехпродуктовый турбоциклон

При конструировании турбоциклонов предполагалось, что замена насоса турбинкой снизит удельный расход электроэнергии, однако это предположение не оправдалось.

Турбоциклоны не обладают технологическими преимуществами перед коническими гидроциклонами, но более сложны по конструкции (ввиду наличия вращающейся с большой скоростью турбинки и трудности уплотнения вала) и поэтому имеют ограниченное применение в промышленности.

Цилиндрические гидроциклоны

Цилиндрический гидроциклон (рис. 14) состоит из двух циклонов: основного — цилиндрического 3 и переливного — конического 6. Исходный продукт, входящий через питающий патрубок 1, разделяется в цилиндрическом гидроциклоне на два

продукта: верхний, удаляющийся через патрубок 2, и нижний, переходящий по каналу 4 в конический гидроциклон. Наиболее тяжелая фаза покидает аппарат через регулируемую насадку 7, а через патрубок 5 выходит промежуточный продукт, который снова может быть направлен на рециркуляцию в цилиндрический гидроциклон 3.

Технологические показатели цилиндрических гидроциклонов приблизительно такие же, как и у конических.

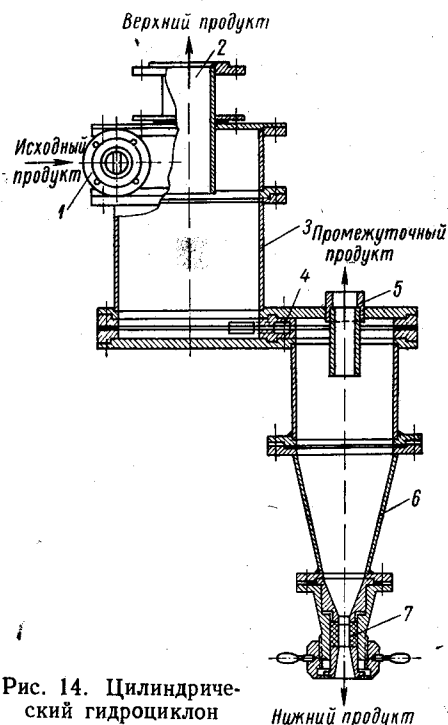


Рис. 14. Цилиндрический гидроциклон

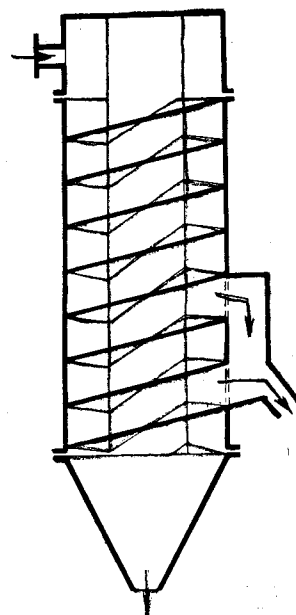


Рис. 15. Винтовой гидроциклон

Винтовые гидроциклоны

На рис. 15 показан винтовой гидроциклон, в котором основной поток движется по спирали. При этом более тяжелая фаза из внешнего слоя потока отводится наружу, а более легкая фаза разгружается через насадку.

К винтовым гидроциклонам относится также гидроциклон с неподвижным направляющим колесом. В этом гидроциклоне центробежная сила возникает при движении жидкости через лопатки колеса. В отличие от обычных гидроциклонов здесь жидкость вводится сверху по оси аппарата. Более легкая фаза отводится через трубу, расположенную по оси аппарата, а более тяжелая фаза — через нижний тангенциально расположенный патрубок.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОЦИКЛОНОВ

4. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ГИДРОЦИКЛОНАХ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ

Схема потоков жидкости в гидроциклоне представлена на рис. 16. При работе гидроциклона возникают два основных круговых потока: внешний 2, направленный к вершине конуса, и внутренний 1, направленный в противоположную сторону. При движении внешнего потока небольшая часть жидкости выходит через нижнее отводное отверстие, а часть жидкости отделяется и, двигаясь в радиальном направлении, вливается во внутренний поток. Основное количество жидкости у вершины конуса изменяет направление и, образуя внутренний восходящий поток, удаляется через верхнее отводное отверстие в диафрагме.

Режим движения жидкости в гидроциклоне турбулентный. Передача вращения от периферии внутрь происходит диффузией и конвекцией под действием вращающего момента сил, вязкости и перемещения самой завихренной жидкости [2].

При значительной скорости потока вдоль оси гидроциклона образуется воздушный столб 3.

Таким образом, в гидроциклоне кроме двух основных вращающихся потоков жидкости (внешнего и внутреннего) образуется третий воздушный поток — воздушный столб. Потоки жидкости направлены по логарифмической спирали. Внешний поток ограничивается стенкой гидроциклона и поверхностью внутреннего потока, который, в свою очередь, ограничивается с внутренней стороны воздушным столбом.

Приведенная схема движения потоков дает весьма упрощенное представление о реальном движении жидкости в гидроциклоне.

В действительности гидродинамические условия в гидроциклоне значительно сложнее, так как наряду с круговыми потоками возникают радиальные и циркуляционные токи (рис. 17).

Гидравлика потоков в гидроциклоне, как видно из рис. 16 и 17, крайне сложная, поэтому точного математического выражения движения потоков в гидроциклоне до сих пор нет. Изучение распределения скоростей производилось многими исследователями.

В любой точке гидроциклона скорость движения жидкости может быть разложена на следующие три составляющие:

тангенциальную скорость v_t , направленную перпендикулярно радиусу вращения в данной точке на горизонтальной плоскости; радиальную скорость v_r , направленную по радиусу гидроциклона внутрь его;

осевую или вертикальную скорость v_v , направленную под прямым углом к v_t и v_r , вдоль оси гидроциклона.

В каждой точке гидроциклона в плоскости, перпендикулярной его оси, жидкость будет иметь скорость движения c , состоящую из тангенциальной и радиальной скоростей,

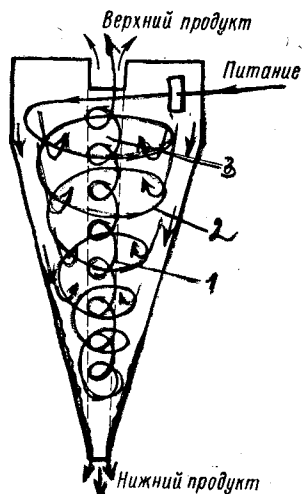


Рис. 16. Схема потоков жидкости в гидроциклоне

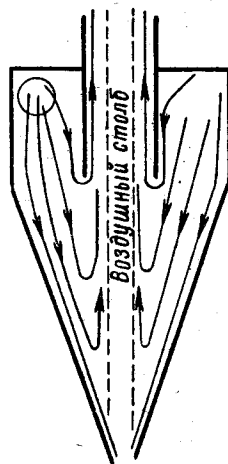


Рис. 17. Характер осевого и радиального течений в гидроциклоне

$$\left. \begin{aligned} c &= \sqrt{v_t^2 + v_r^2}; \\ \operatorname{tg} \alpha &= \frac{v_t}{v_r}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

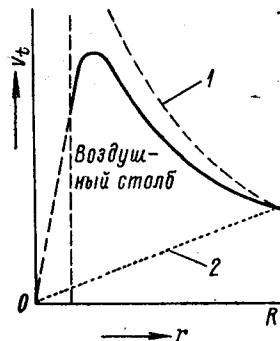


Рис. 18. Профиль тангенциальных скоростей в гидроциклоне

Дриссен [23] считает, что отношение тангенциальной и радиальной скоростей жидкости в любой точке гидроциклона является величиной постоянной, т. е. $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const}$.

Это означает, что поток жидкости в гидроциклоне движется по логарифмической спирали, полюс которой расположен на оси гидроциклона.

Тангенциальная скорость, согласно закону сохранения углового момента, увеличивается с уменьшением радиуса вращения. При этом произведение тангенциальной скорости на радиус вращения имеет тенденцию сохранять постоянное значение, т. е. $v_t r = \operatorname{const}$ (рис. 18, кривая 1). Однако из-за трения потока о стенку аппарата и внутреннего трения, обусловленного вязкостью и турбулентностью, получаются некоторые отклонения от указанной выше зависимости. Если бы потери на трение были определяющими, то тангенциальная скорость была бы пропорциональна радиусу, т. е. $v_t = \operatorname{const}$ (рис. 18, кривая 2). Действительный профиль распределения тангенциальной скорости находится между кривыми 1 и 2.

Для хорошего разделения необходимо обеспечивать высокие тангенциальные скорости, поэтому внутренняя поверхность дол-

жна быть возможно более гладкой, чтобы уменьшить трение и турбулентность потоков. В хорошо сконструированных гидроциклонах профиль тангенциальной скорости соответствует постоянству величины $\frac{v_t}{r}$ при возрастании значений критерия Рейнольдса.

В центральной части столба жидкости, вращающейся под патрубком для вывода верхнего продукта, радиальная скорость практически отсутствует и поэтому здесь нет радиального переноса углового момента. Поэтому в указанной части гидроциклона определяющими являются потери на трение, что и обуславливает профиль тангенциальной скорости соответствовать постоянству величины $\frac{v_t}{r}$.

Гидродинамика вихрей вообще, а в гидроциклоне в особенности, является сложной и недостаточно изученной. Здесь имеет место непрерывное движение жидкости, следовательно, должно быть справедливо уравнение неразрывности жидкой среды

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_r)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_t)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_v)}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

где t — время;

v_t , v_r и v_v — составляющие скорости частицы в произвольной точке пространства по направлению прямоугольных осей координат X , Y и Z .

Если принять для воды $\rho = \operatorname{const}$, то уравнение (9) примет вид

$$\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_t}{\partial y} + \frac{\partial v_v}{\partial z} = 0. \quad (10)$$

В гидроциклоне имеет место установившееся движение без завихрений с потенциалом скоростей. При наличии функции потенциала скоростей $\varphi(x, y, z)$

$$v_r = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad v_t = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad v_v = \frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

уравнение (10) принимает вид уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (11)$$

Если допустить, что осевая скорость $v_v = \operatorname{const}$, то в каждом радиальном сечении гидроциклона $\frac{\partial v_v}{\partial z} = 0$. Тогда уравнение (10) примет вид

$$\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_t}{\partial y} = 0. \quad (12)$$

Учитывая ранее сказанное, можно предположить, что в рассматриваемом сечении скорости частицы жидкости, движущейся по спирали, должны являться функциями только одного радиуса вращения.

После приведения уравнения (12) к полярным координатам и учета зависимости скоростей только от радиуса вращения получаем

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_t}{r \partial \theta} = 0. \quad (13)$$

Так как радиус вращения не зависит от полярного угла, то

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} = 0,$$

следовательно,

$$v_r r = \text{const} \quad (14)$$

и

$$v_t r = \text{const}. \quad (15)$$

Полная скорость w частицы жидкости

$$w = \sqrt{v_t^2 + v_r^2} = \frac{C}{r}$$

или

$$wr = C, \quad (16)$$

т. е. произведение скорости частицы и соответствующего радиуса в гидроциклоне для идеальной жидкости является величиной постоянной.

Для регулирования процесса разделения в гидроциклоне необходимо знать соотношение тангенциальной и радиальной скоростей движения, так как он происходит в основном под действием центробежной силы и силы взаимодействия частицы с радиальным потоком жидкости, величины которых определяются этими составляющими скоростями.

Наиболее полное экспериментальное исследование по измерению скоростей движения жидкости в гидроциклоне было проведено Келсаллом [26], изучавшим движение тонких алюминиевых стружек в водной среде при незначительной концентрации их на прозрачной модели гидроциклона диаметром 76 мм. Наблюдение за движением частиц производилось оптическим методом (с помощью стробоскопа). Опыты показали, что скорость движения частиц близка к скорости движения жидкости (расхождение между ними не превышает 5%).

Прямыми замерах Келсаллу удалось построить поле тангенциальных и вертикальных скоростей жидкости в середине конической части гидроциклона. Радиальные составляющие скорости вычислялись по уравнению неразрывности с использованием величин тангенциальных и вертикальных скоростей, полученных экспериментальным путем. На рис. 19 показано изменение величин этих скоростей в зависимости от радиуса вращения для ряда горизонтальных сечений аппарата. На оси ординат указаны расстоя-

ния сечения от нижнего выходного отверстия, а на оси абсцисс — расстояния по радиусу от оси гидроциклона.

На основании проведенных экспериментальных исследований, Келсалл пришел к следующим выводам.

1. В сечениях ниже кромки диафрагмы между тангенциальной скоростью и радиусом вращения существует зависимость $v_t r^n = \text{const}$, причем показатель степени n является величиной переменной, зависящей от радиуса вращения. Наибольшее значение $n = 0,52$ было получено у стенки гидроциклона. На радиусе воздушного столба $n = 0,3$; в области выше диафрагмы эта зависимость не сохраняется, хотя характер изменения тангенциальной скорости почти не отличается от характера изменения в нижележащей зоне.

На рис. 19, а показана зависимость (в логарифмических координатах) тангенциальной скорости v_t от радиуса при давлении питания $2,8 \text{ кг/см}^2$ для различных сечений гидроциклона. Тангенциальная скорость в гидроциклоне увеличивается при уменьшении радиуса вращения жидкости, достигая своего максимального значения вблизи внутреннего восходящего потока между диафрагмой 2 и воздушным

1280

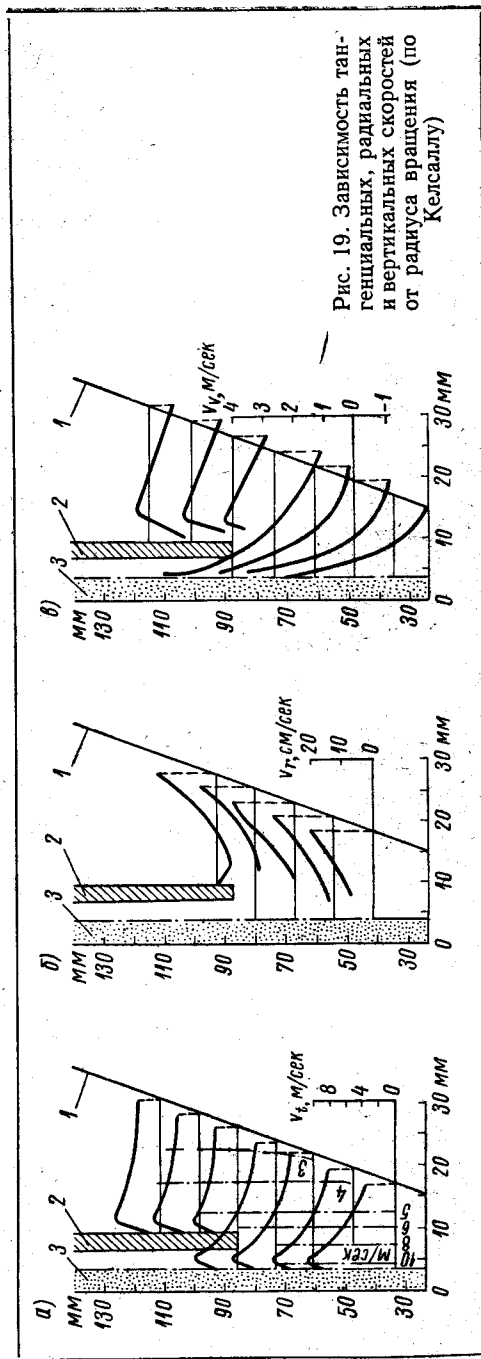


Рис. 19. Зависимость тангенциальных, радиальных и вертикальных скоростей от радиуса вращения (по Келсаллу)

столбом 3. Затем она резко уменьшается и становится равной нулю на оси гидроциклона.

2. Распределение радиальных скоростей v_r показано на рис. 19, б. Значения радиальной скорости изменяются по высоте гидроциклона. В сечениях выше кромки диафрагмы радиальная скорость, направленная внутрь, имеет наибольшее значение вблизи стенки корпуса 1 гидроциклона, уменьшается по мере перемещения жидкости в направлении к оси гидроциклона и становится равной нулю вблизи диафрагмы. На горизонтальных уровнях

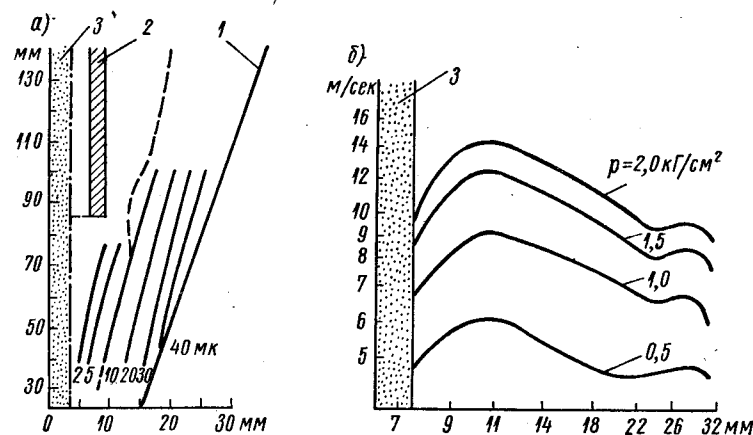


Рис. 20. Поверхность равновесия в гидроциклонах и зависимость тангенциальной скорости от радиуса вращения

ниже кромки диафрагмы радиальная скорость падает с уменьшением радиуса и становится равной нулю на границе воздушного столба.

3. Вертикальная составляющая скорости жидкости v_z изменяется в зависимости от радиуса вращения по величине и по направлению (рис. 19, в). Вблизи стенки гидроциклона вертикальная скорость направлена вниз и имеет наибольшее значение. По мере уменьшения радиуса вращения она уменьшается, становится равной нулю, а затем, изменив направление на восходящее, достигает максимального значения на границе с воздушным столбом.

Нулевая поверхность, проходящая через точки с нулевой вертикальной скоростью жидкости, отделяет часть потока, движущегося вниз, от части потока, движущегося вверх.

Келсалл экспериментально определил в указанном выше гидроциклонах для частиц кварцевой муки различных размеров поверхности, которые соответствуют равновесию частиц данного размера (рис. 20, а; позиции те же, что и на рис. 19). Штриховая линия

на этом рисунке представляет собой геометрическое место точек, в котором вертикальные скорости равны нулю. Внутри области, ограниченной этой линией, поток направлен вверх, а вне ее — вниз. Пересечение штриховой линии с линией для частиц в 10 мк указывает на крупность разделения, достигаемую в данном случае.

В Государственном институте горнохимического сырья (ГИГХС) [4] измерение тангенциальных скоростей производилось не тем методом, которым пользовался Келсалл. Параметры исследуемого гидроциклона значительно отличались от параметров гидроциклона Келсалла. Гидроциклон имел диаметр 75 мм с конусностью 20°, диаметр верхнего отверстия 25,3 мм, диаметр нижнего отверстия 14,6 мм и высоту диафрагмы, равную высоте цилиндрической части.

Тангенциальная скорость жидкости v_t определялась по формуле

$$v_t = \sqrt{2g(H_n - h_{ст}) \frac{\gamma_p - \gamma_{жс}}{\gamma_{жс}}}, \quad (17)$$

где H_n — полное давление внутри гидроциклона в м вод. ст.;

$h_{ст}$ — статическое давление в м вод. ст.;

γ_p — плотность ртути в кг/м³;

$\gamma_{жс}$ — плотность жидкости в кг/м³.

Для измерения полного и статического давлений применялись трубки, вводимые внутрь гидроциклона через специальные отверстия в его стенке. В радиальном направлении трубки перемещались с помощью микрометрических винтов. Для измерения статического давления использовались прямые трубки, для измерения полного давления — трубки Пито. Трубки соединялись с ртутными манометрами.

Поле статических и полных давлений было снято при четырех значениях давления питания: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 кг/см². Максимальное статическое давление наблюдалось у стенок гидроциклона и уменьшалось с приближением к его оси. На расстоянии 12 мм от оси гидроциклона избыточное статическое давление уменьшалось до нуля, при дальнейшем приближении к воздушному столбу становилось отрицательным, а на границе с воздушным столбом приобретало минимальное значение.

Зависимость тангенциальной скорости от радиуса вращения, построенная по экспериментальным данным, идентична кривым, приведенным на рис. 20, а.

На рис. 20, б приведена зависимость тангенциальной скорости v_t от радиуса вращения для одного из горизонтальных сечений, построенная в логарифмических координатах для четырех входных давлений.

Для участка кривых, находящихся в интервале значений r от 11 до 24 мм, соотношения между v_t и r выражаются уравнением (5), причем $n = 0,587$.

Следует отметить, что тангенциальная скорость будет максимальной почти на том же расстоянии от оси гидроциклона, на котором статическое давление равно нулю. Как видно из рис. 20, б, при входном давлении $2,0 \text{ кг/см}^2$ наибольшая тангенциальная скорость 15 м/сек . Этой скорости соответствует угловая скорость $13\,000 \text{ об/мин}$. При этом центробежное ускорение жидкости $a \approx 14\,000 \text{ м/сек}^2$, что почти в 1400 раз превышает ускорение земного притяжения.

При сравнении результатов, полученных Келсаллом и в ГИГХСе, легко убедиться, что кривые изменения тангенциальной скорости по радиусу в обоих опытах очень близки и по форме и по абсолютному значению скорости (у Келсалла при $p = 2,8 \text{ кг/см}^2$ $v_{t \max} = 14,8 \text{ м/сек}$, в ГИГХСе при $p = 2,0 \text{ кг/см}^2$ $v_{t \max} = 14,0 \text{ м/сек}$).

Дриссен [23] получил следующую аналитическую зависимость между v_t и r :

$$v_t = \frac{C}{n+1} r^n + \frac{C_1}{C}, \quad (18)$$

где C и C_1 — постоянные величины.

Из уравнения (18) следует, что тангенциальная скорость v_t является функцией радиуса вращения r .

Зависимость между v_t и r , найденная Кринером [21],

$$\frac{v_t}{v_{t_1}} = \frac{r_1}{r} \left(1 + \frac{2}{2 - \frac{C}{v}} \right) \left[\left(\frac{r}{r_1} \right)^{r - \frac{C}{v}} - 1 \right], \quad (19)$$

где v — кинематическая вязкость жидкости в $\text{м}^2/\text{сек}$;
 C — постоянная величина,

$$C = \frac{Q}{2\pi L}. \quad (20)$$

Здесь Q — производительность гидроциклона в $\text{м}^3/\text{сек}$;
 L — длина воздушного столба в м .

Из уравнения (19) видно, что при условии приближения кинематической вязкости к нулю, т. е. при $\frac{C}{v} \rightarrow \infty$

$$v_t r = v_{t_1} r_1 = \text{const}; \quad (21)$$

при $\frac{C}{v} \rightarrow 0$

$$\frac{v_t}{r} = \frac{v_{t_1}}{r_1} = \omega = \text{const}, \quad (22)$$

где ω — угловая скорость вращения в $1/\text{сек}$.

Так как для жидкости не может быть $\frac{C}{v} \rightarrow 0$, то в гидроциклоне не может вращаться жидкость с постоянной угловой скоростью.

Для идеальной жидкости справедливо уравнение (21), но оно неприменимо для реальной жидкости. По-видимому, зависимость между v_t и r для движения жидкости в гидроциклоне должна находиться между этими двумя граничными случаями, т. е. характеризоваться уравнением (5).

Фонтейн и Дийксман [24] измеряли величину давления в различных точках гидроциклона и определяли тангенциальные скорости по уравнению

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{v_t^2}{r}. \quad (23)$$

Тангенциальные скорости определялись также экспериментально и стробоскопическим методом, причем найденные величины тангенциальных скоростей оказались равными [24]. Ими предложена следующая зависимость между тангенциальной скоростью и радиусом вращения:

$$v_t = \frac{C_1}{r} + C_2 r, \quad (24)$$

где C_1 и C_2 — коэффициенты, зависящие от конструкции гидроциклона и числа Рейнольдса.

Из уравнений (23) и (18) видно, что характер зависимости между v_t и r соответствует промежуточному случаю между «свободным вихрем», наблюдавшимся в условиях завихрения воды, вытекающей из отверстия в дне сосуда ($v_t r = \text{const}$), и вращения жидкости подобно сплошной твердой массе, как в центрифугах ($\frac{v_t}{r} = \text{const}$).

Анализируя уравнение $v_t r^n = \text{const}$, Тарьян [30] сделал предположение, что показатель степени n является функцией давления, а его величина колеблется в пределах от 1 до -1 . Если $n = 1$, то $v_t r = \text{const}$, т. е. наблюдается случай «свободного вихря», который имеет место в естественных условиях или при завихрениях воды, свободно вытекающей через отверстие в дне сосуда.

Если $n = -1$, то $\frac{v_t}{r} = \omega = \text{const}$, т. е. жидкость движется в гидроциклоне подобно твердому телу.

Поваров [14] экспериментально установил, что во внешнем потоке тангенциальная скорость сохраняется почти постоянной и имеет меньшую величину, чем входная скорость потока; во внутреннем потоке тангенциальная скорость возрастает с уменьшением радиуса вращения и при малых диаметрах верхнего отводного отверстия превышает скорость на входе.

Деметер [22] считает, что слои жидкости вращаются в гидроциклоне с постоянной тангенциальной скоростью, по спиралевидной траектории вынужденно приближаясь к оси гидроциклона,

и тангенциальная скорость в гидроциклоне равна скорости жидкости у его входа.

Акопов и Классен [2] считают, что уравнение (5), выражающее зависимость между тангенциальной скоростью и радиусом вращения, при вихревом движении жидкости остается справедливым.

Однако величина показателя степени n зависит от конструкции гидроциклона, отношения диаметров выходных отверстий и изменяется в более широких пределах; лишь в частных случаях тангенциальная скорость увеличивается с уменьшением радиуса.

По полученным ими данным тангенциальная скорость движения жидкости в гидроциклоне не является величиной постоянной на различных радиусах (как это утверждает Деметр), но ее изменение не всегда следует зависимости $v_t r^n = \text{const}$, где показатель степени n , по Келсаллу, составляет 0,52—0,3.

Изменение тангенциальной скорости в зависимости от радиуса определяется главным образом размером верхнего отводного отверстия, а размер нижнего отводного отверстия здесь почти не оказывает влияния.

При больших диаметрах верхнего отводного отверстия тангенциальная скорость резко снижается при уменьшении радиуса.

При малых размерах верхнего отверстия тангенциальная скорость медленно возрастает с уменьшением радиуса, достигая максимального значения на границе с воздушным столбом, после чего резко падает до нуля у осевой части гидроциклона.

Вследствие того что жидкость в гидроциклоне движется вначале по внутренней стенке, а затем — к осевой зоне, возникают радиальные скорости v_r , которые направлены от периферии к оси вдоль радиуса гидроциклона.

Зависимость радиальной скорости от радиуса показана на рис. 19, б

Дриссен, Тарьян, Кринер и Деметр считают, что между радиальной скоростью и радиусом существует следующая зависимость:

$$v_r = -\frac{Q}{2\pi h_2 r}, \quad (25)$$

где h_2 — высота воздушного столба в м.

Исходя из этого условия, Тарьян вывел формулу для определения величины радиальной скорости в гидроциклоне

$$v_r = \frac{v_t d_n^2}{8 h_2 r}, \quad (26)$$

где d_n — диаметр питающего отверстия в м.

5. ДВИЖЕНИЕ СЕПАРИРУЕМОЙ ЧАСТИЦЫ В ГИДРОЦИКЛОНЕ

Процесс разделения суспензий в гидроциклоне можно представить следующим образом. На частицу, находящуюся в потоке жидкости, в гидроциклоне действуют в основном две силы (не считая силу инерции): центробежная P , отбрасывающая частицу к периферии, и сила S , возникающая от действия радиального потока жидкости и действующая в направлении к оси аппарата.

Величина центробежной силы определяется по формуле

$$P = \frac{mv_t^2}{r}, \quad (27)$$

где m — масса частицы в кг·сек²/м.

Подставив в уравнение (27) значение величин $m = \frac{G}{g}$ и $v_t = \frac{\pi n r}{30}$, получим формулу для приближенного определения величины центробежной силы

$$P = \frac{G n^2}{900}, \quad (28)$$

где G — вес частицы в кг;

n — число оборотов частицы вокруг оси гидроциклона в минуту.

Величина силы, возникающей от действия радиального потока жидкости, в пределах действия закона Стокса определяется по формуле

$$S = 3\pi \mu d v_r, \quad (29)$$

где μ — вязкость среды в кг/м·сек;

d — диаметр частицы в м.

Подставив значение v_r из формулы (25), получим

$$S = \frac{3\pi Q d}{2 h_2 r}. \quad (30)$$

Соотношением величин центробежной силы и силы сопротивления среды и определяется направление движения частиц в гидроциклоне. Если центробежная сила будет больше силы сопротивления среды, то частицы будут отброшены к стенке гидроциклона и вместе с внешним потоком переместятся вниз и выйдут через нижнее отводное отверстие. При преобладании действия радиального потока частицы попадут в зону внутреннего потока и удалятся через верхнее отводное отверстие в диафрагме. В случае равенства указанных сил, действующих на частицу, она будет продолжительное время циркулировать в гидроциклоне.

6. О ВОЗДУШНОМ СТОЛБЕ В ГИДРОЦИКЛОНЕ

В гидроциклоне в первый момент заполнения жидкостью (водой) образуется вращающаяся воронка. Поперечные размеры ее по мере дальнейшего заполнения уменьшаются, и при истечении жидкости из выходных отверстий внутри его образуется постоян-

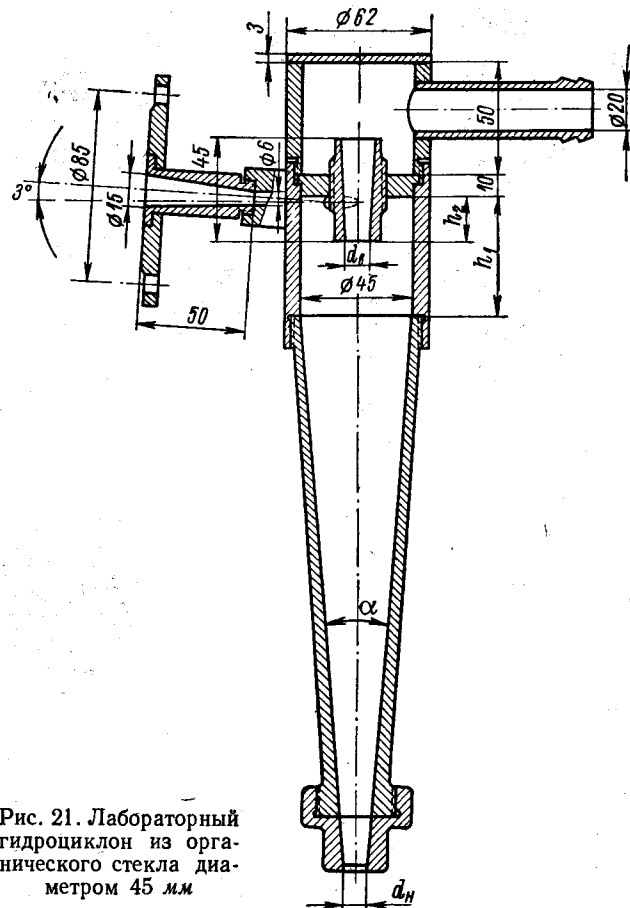


Рис. 21. Лабораторный гидроциклон из органического стекла диаметром 45 мм

ный проходящий по оси воздушный столб. Форма и размеры его имеют важное значение для работы гидроциклона, что вынудило поставить ряд опытов для уточнения этих вопросов.

Опыты на воде с прозрачной моделью гидроциклона (рис. 21) проводились на лабораторной установке, состоящей из шестерчатого насоса, гидроциклона, манометра, трубопроводов и вентилей для изменения давления питания и количества воды, подаваемой в гидроциклон.

Было изучено влияние следующих параметров гидроциклона на размер и форму воздушного столба: давления питания p на входе в гидроциклон, диаметров верхнего отводного отверстия (отверстия диафрагмы) $d_в$ и нижнего отводного отверстия $d_н$, высоты h_1 цилиндрической части гидроциклона, глубины погружения h_2 диафрагмы (по нижнему обрезу) в цилиндрическую часть гидроциклона, угла конуса α гидроциклона.

Диаметры воздушного столба измеряли в трех горизонтальных сечениях: у нижнего обреза диафрагмы — d_{10} , у основания конуса — d_{11} и у меньшего диаметра конической части гидроциклона — d_{12} .

Для определения влияния эффекта подсосывания воздуха через $d_н$ и $d_в$ в зависимости от условий выхода верхнего и нижнего продуктов были проведены опыты (табл. 1) при $p = 4,0 \text{ кг/см}^2$, $d_в = 7,4 \text{ мм}$, $d_н = 4,5 \text{ мм}$, $h_1 = 45,0 \text{ мм}$, $h_2 = 21,0 \text{ мм}$ и $\alpha = 10^\circ$.

Таблица 1

Влияние условий выхода верхнего и нижнего продуктов на размеры воздушного столба

Выход продукта	Диаметр воздушного столба в мм		
	d_{10}	d_{11}	d_{12}
Верхнего и нижнего — свободный	3,82	3,71	4,25
Верхнего — под уровень, нижнего — свободный	3,71	2,84	3,37
Верхнего и нижнего — под уровень	3,54	2,50	3,10

Из таблицы видно, что воздушный столб имеет наибольшие размеры при свободном выходе обоих продуктов. Следовательно, в этом случае имеет место подсос воздуха через оба отводных отверстия.

В дальнейшем для исключения влияния подсоса воздуха и уточнения причин образования воздушного столба опыты проводились при выходе верхнего и нижнего продуктов под уровень.

Полученные данные позволяют заключить, что воздушный столб появляется, когда жидкость начинает вытекать из обоих выходных отверстий.

Причины образования столба — разрыв сплошности потока жидкости из-за большой величины центробежной силы вблизи оси гидроциклона и выделение воздуха из воды в результате интенсивного вихреобразования.

Появление воронки возникает из-за вращения жидкости вокруг оси, нормальной к плоскости отверстия и проходящей через его центр.

Вращение (не учитывая потери на внутреннее трение) происходит по закону

$$vr = \text{const}, \quad (31)$$

где v — окружная скорость вращения в м/сек.

Из формулы следует, что для частиц при $r = \infty$ $v = 0$, а при $r = 0$ $v \rightarrow \infty$.

Из уравнения Бернулли—Эйлера

$$Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{const}, \quad (32)$$

где $Z + \frac{p}{\gamma}$ — потенциальная энергия потока в кг·м²/сек²;
 $\frac{v^2}{2g}$ — кинетическая энергия потока в кг·м²/сек²,

видно, что с увеличением v падает давление p при заданной высоте Z , и, очевидно, что оно будет возможным только до $p = 0$. После этого в жидкости, вблизи оси гидроциклона, будут образовываться пустоты, быстро заполняемые парами жидкости и находящимися в ней газами.

Для рассмотрения процесса течения жидкости в гидроциклоне сделаем следующие допущения.

1. Движение жидкости вне центральной части гидроциклона подчинено закону моментов, т. е.

$$v_t = \frac{C}{r}. \quad (33)$$

2. Движением жидкости по радиусу пренебрегаем ($v_r = 0$).

3. Движение жидкости параллельно оси гидроциклона определяется по закону расходов, т. е.

$$v_o = \frac{Q}{F}, \quad (34)$$

где v_o — вертикальная скорость движения жидкости в м/сек;
 F — площадь сечения жидкости в гидроциклоне на данной высоте в м².

4. Движение всей жидкости вне центральной части потенциальное и установившееся.

При сделанных предположениях во всей массе жидкости вне центральной части гидроциклона будет справедлива теорема Эйлера, т. е.

$$Z + \frac{p_o}{\gamma} + \frac{v_o^2 + v_t^2}{2g} = Z_o + \frac{p_o}{\gamma} + \frac{v_o^2}{2g}, \quad (35)$$

где Z_o , p_o , v_o — высота, давление и скорость при входе в гидроциклон.

Для определения свободной поверхности жидкости S , образующейся в гидроциклоне, необходимо теоретически определить те точки потока, в которых $p = 0$.

Из формулы (35) для этой поверхности получим

$$Z = Z_o + \frac{p_o}{\gamma} + \frac{v_o^2 - v_t^2}{2g} - \frac{v_t^2}{2g}.$$

В первом приближении первых три члена правой части этого выражения можно считать постоянными. Обозначим их H_o , а в последнем члене заменим v_t значением из формулы (33).

Тогда

$$Z = H_o - \frac{C^2}{2g} \cdot \frac{1}{r^2}. \quad (36)$$

Кривая, изображающая сечение свободной поверхности S в плоскости, показана на рис. 22.

Из формулы (36) и рис. 22 видно, что при малых напорах гидроциклоны работают на верхней части кривой, а при больших — на нижней.

С увеличением p после образования воздушного столба диаметры последнего резко увеличиваются, а затем несколько уменьшаются (в наших опытах после увеличения p выше 2,0 кг/см² — табл. 2).

Это объясняется подсосом воды через нижнее отводное отверстие, который начинается по достижении p указанного значения. Но при свободном выходе нижнего и отводе верхнего продуктов под уровень размеры воздушного столба с увеличением p

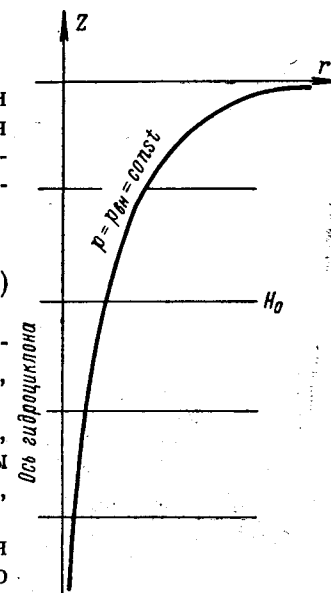


Рис. 22. Кривая меридионального сечения свободной поверхности гидроциклона

Таблица 2

Влияние изменения давления питания на размеры воздушного столба

в кг/см ²	Диаметр воздушного столба в мм		
	d_{10}	d_{11}	d_{12}
6,0	5,18	4,76	5,28
4,0	5,18	5,03	5,24
2,0	5,63	5,76	6,90
0,15	—	0,81	1,02

Таблица 3

Влияние изменения диаметра верхнего отводного отверстия на размеры воздушного столба

Диаметр верхнего отводного отверстия d_o в мм	Диаметр воздушного столба в мм		
	d_{10}	d_{11}	d_{12}
0	0,95	0,78	0,92
7,4	4,15	—	3,80
11,2	5,63	5,76	6,90

продолжают возрастать. Поэтому для стабильной работы гидроциклона, которая значительно зависит от воздушного столба, необходимо отвод верхнего продукта производить под уровень, а отвод нижнего продукта должен быть свободным, зонтообразного типа. С увеличением d_n размеры воздушного столба резко возрастают (табл. 3).

Воздушный столб сохраняется при полностью закрытом верхнем отводном отверстии. С увеличением d_n столб несколько изменяет форму: d_{10} и d_{11} незначительно уменьшаются, а d_{12} увеличивается (табл. 4).

Воздушный столб сохраняется при полностью закрытом нижнем отводном отверстии. Увеличение h_1 и h_2 вызывает незначительное уменьшение размеров воздушного столба.

Увеличение угла α при постоянных остальных параметрах гидроциклона приводит к значительному увеличению размеров воздушного столба (табл. 5).

Таблица 4

Влияние изменения диаметра нижнего отводного отверстия на размеры воздушного столба

Диаметр нижнего отводного отверстия d_n в мм	Диаметр воздушного столба в мм		
	d_{10}	d_{11}	d_{12}
0	5,70	5,60	5,60
4,5	5,54	5,40	6,26
6,5	5,18	5,03	5,24
10,0	5,08	5,06	6,70

Таблица 5

Влияние изменения угла конической части гидроциклона на размеры воздушного столба

α в град	Диаметр воздушного столба d_{10} в мм при	
	$\rho = 4,0 \text{ кг/см}^3$	$\rho = 2,0 \text{ кг/см}^3$
10	5,08	5,29
20	6,40	6,62
30	9,14	7,44

7. ЗАКОНОМЕРНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОЦИКЛОНОВ

Для получения соотношений, характеризующих качество разделения, и для определения количества выделившейся твердой фазы в проектируемом гидроциклоне на основании опытных данных, полученных на модели, Травинский [15] предлагает следующий метод пересчета данных модели на натуру.

Для отделения частицы в разделяющей аппаратуре существенное значение имеют три величины: скорость осаждения u_s , толщина слоя осаждения суспензии δ и среднее время пребывания суспензии в гидроциклоне T .

Из этих трех величин может быть составлен безразмерный параметр — критерий сепарации.

$$k_s = \frac{u_s T}{\delta}. \quad (37)$$

Скорость осаждения u_s частицы диаметром d_1 в центробежном отделителе может быть установлена по закону Стокса с заменой ускорения свободного падения g радиальным ускорением a_r .

Тогда

$$u_s = \frac{d_1^2}{18} \cdot \frac{q_1 - q_2}{\eta} a_r, \quad (38)$$

где η — коэффициент вязкости среды в $\text{кг/м} \cdot \text{сек}$.

При наличии геометрического подобия гидроциклонов a_r можно заменить выражением $\frac{v_t^2}{r}$, где r — средний радиус разделения. Вместо среднего радиуса разделения r и средней толщины слоя суспензии δ можно подставить пропорциональную им величину диаметр гидроциклона D .

Время пребывания частиц в гидроциклоне T приближенно выражается числом оборотов потока вдоль стенок аппарата n_w

$$T \approx \frac{D n_w}{v_t}. \quad (39)$$

Подставив значения u_s и T в уравнение (37), получим

$$k_s = \frac{d_1^2}{18} \cdot \frac{q_1 - q_2}{\eta} \cdot \frac{v_t^2}{D} \cdot \frac{D n_w}{v_t D}.$$

После сокращения и замены $\frac{1}{18}$ через const, получим

$$k_s = \text{const } d_1^2 \frac{q_1 - q_2}{\eta} \cdot \frac{v_t n_w}{D}. \quad (40)$$

Полученная величина k_s является критерием достигаемой степени разделения, количественная величина которого может быть получена на основании эмпирических формул.

Таким образом, для получения одного и того же эффекта разделения в геометрически подобных гидроциклонах параметр k_s должен иметь у них одно и то же численное значение.

Значительно проще способ моделирования гидроциклонов, предложенный Поваровым. Он установил, что результаты разделения в гидроциклонах зависят главным образом от величины отношения диаметров нижнего и верхнего отводных отверстий, которую можно рассматривать как симплекс геометрического подобия гидроциклонов. Определив опытным путем для данной суспензии на модели зависимость основных характеристик

гидроциклона (выход верхнего и нижнего продуктов, кратность осветления, коэффициент обогащения и др.) от симплекса, можно полученные данные использовать для определения параметров гидроциклона натуральной величины.

Однако анализ этого симплекса, проведенный Зайцевым [7], показал, что хотя для подобных гидроциклонов d_n/d_s остается постоянным, диаметр минимальной отсепарированной частицы обязательно изменяется в соответствии с коэффициентом геометрического подобия.

Для пересчета параметров подобных гидроциклонов Зайцев предлагает следующую формулу:

$$d_1 \approx \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{\rho}} \quad (41)$$

Глава III

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ ФАЗ В ГИДРОЦИКЛОНАХ

8. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ ФАЗ В ГИДРОЦИКЛОНАХ

Факторы, влияющие на процесс разделения фаз, могут быть технологические и конструктивные.

При отделении жира от воды к первой группе относятся следующие факторы:

- содержание жира в воде;
- физическое состояние жира, зависящее от температуры, т. е. от места установки гидроциклона в технологической линии;
- крупность жировых частиц;
- содержание посторонних примесей (белковой ткани и мелких кусочков кости при производстве костного пищевого жира) и их размеры (крупность кусочков кости);
- равномерность подачи питания;
- плотность разделяемых фаз;
- давление питания p на входе в гидроциклон;
- производительность Q гидроциклона.

Факторы, зависящие от конструкции гидроциклона (рис. 23).
1. Конструкция верхней разгрузочной части гидроциклона: разгрузка легкой фазы через отводной верхний патрубок (см. рис. 3);

разгрузка легкой фазы через диафрагму и приемник (рис. 23, размеры h_3 , h_4 , d_2 , d_3 , R_1 , R_2 и R_3).

2. Форма входного отверстия и размеры питающего патрубка: форма и размеры входного отверстия d_n , a и b ; размещение входного отверстия на цилиндрической части гидроциклона;

отношение площади питающего патрубка к сечению подводящего трубопровода;

угол сужения β питающего патрубка;

угол наклона φ питающего патрубка к горизонту.

3. Диаметр верхнего отводного отверстия d_s и глубина погружения диафрагмы h_2 в цилиндрическую часть гидроциклона.

4. Размеры цилиндрической части гидроциклона: высота h_1 цилиндрической части;

диаметр D цилиндрической части (диаметр гидроциклона).

5. Угол конуса α гидроциклона.

6. Диаметр нижней части насадки d_n .

Ниже рассматривается влияние на эффективность разделения и производительность гидроциклона основных факторов, к которым относятся: давление питания на входе в гидроциклон и производительность;

конструктивные размеры гидроциклонов.

9. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ФАЗ В ГИДРОЦИКЛОНАХ

Для сопоставления результатов работы гидроциклонов и влияния различных факторов на процесс разделения рассматриваются следующие характеристики: эффективности разделения — кратность осветления и коэффициент обогащения; гидродинамические — фактор разделения и входная скорость потока; энергетические — мощность, затрачиваемая электродвигателем на привод насоса.

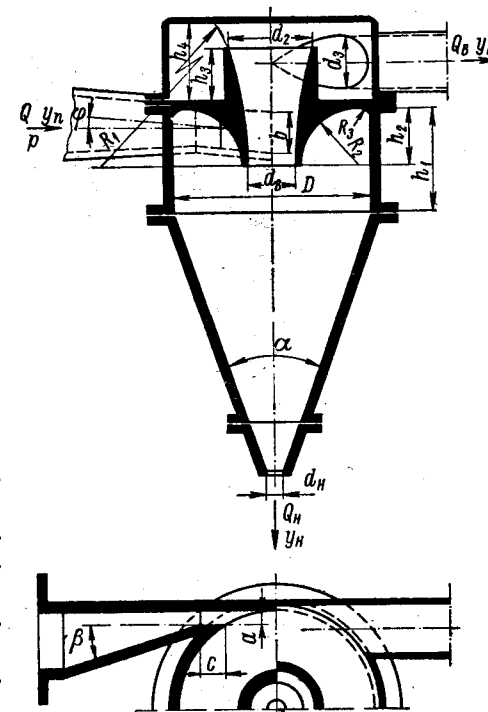


Рис. 23. Основные размеры, определяющие конструкцию гидроциклона

Кратность осветления — это отношение содержания более легкой фазы в питании и нижнем продукте, которое показывает, во сколько раз уменьшилось содержание легкой фазы в единице объема нижнего продукта по сравнению с исходным.

Коэффициент осветления

$$\varepsilon_{осв} = \frac{y_n}{y_k}, \quad (42)$$

где y_n — объемная доля легкой фазы в питании в %;

y_k — объемная доля легкой фазы в нижнем продукте в %.

Произведение выхода нижнего продукта Q_n и величины, обратной кратности осветления, показывает количество легкой фазы, уходящей с нижним продуктом, в процентах к введенной с исходным продуктом.

Коэффициент обогащения — это отношение содержания более легкой фазы в верхнем продукте к содержанию этой фазы в исходном продукте. Он показывает, во сколько раз увеличилось содержание легкой фазы в единице объема верхнего продукта по сравнению с исходным продуктом.

Коэффициент обогащения определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{y_s}{y_n}, \quad (43)$$

где y_s — объемная доля легкой фазы в верхнем продукте в %.

Фактор разделения показывает, во сколько раз скорость осаждения тяжелой фазы (или скорость всплывания легкой фазы) под влиянием центробежной силы больше скорости осаждения (или всплывания) этой фазы при свободном осаждении (всплывании).

Чем больше центробежное ускорение a , тем больше фактор разделения k_p

$$k_p = \frac{a}{g}, \quad (44)$$

где $a = \frac{v^2}{r}$ (v — линейная скорость потока в м/сек).

Выражая величину k_p через диаметр D гидроциклона и линейную скорость v потока, получим

$$k_p = \frac{2v^2}{gD}, \quad (45)$$

или

$$k_p = \frac{D\omega^2}{2g} = \frac{\pi^2}{1800} \cdot \frac{Dn^2}{g} \approx \frac{Dn^2}{1800}, \quad (46)$$

где ω — угловая скорость потока в 1/сек.

Величина радиального ускорения во входной области гидроциклона при безударном входе жидкости

$$k_n = \frac{2U_n^2}{gD}, \quad (47)$$

где U_n — входная скорость потока в м/сек.

При безударном входе

$$U_n = v_{\min} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q}{d_n^2}.$$

Средняя величина фактора разделения k_p , определенного на основе радиального ускорения,

$$k_p = \frac{2v_{\max}^2}{gD}, \quad (48)$$

но

$$v_{\max} = \sqrt{2gH}, \quad (49)$$

где H — давление при входе в гидроциклон в м вод. ст.*

Следовательно,

$$k_p = 4 \frac{H}{D}, \quad (50)$$

D — диаметр гидроциклона в м.

Влияние доли кинетической энергии потока во входном патрубке незначительно.

Входная скорость потока определяется как частное от деления производительности гидроциклона на площадь входа продукта

$$U_n = \frac{Q}{3600S} \text{ м/сек}, \quad (51)$$

где S — площадь входного отверстия в м².

Мощность, затрачиваемая электродвигателем, расходуется на преодоление сопротивлений, создаваемых гидроциклоном и подводящими трубопроводами.

10. ДАВЛЕНИЕ И РАВНОМЕРНОСТЬ ПОДАЧИ ПИТАНИЯ

Полное давление, под которым продукт, подлежащий разделению, вводится в гидроциклон, является одним из наиболее важных факторов, определяющих работу гидроциклона. Это давление определяет производительность гидроциклона и скорость движения продукта внутри гидроциклона, которая обуславливает

* Ввиду относительно малого манометрического давления верхнего продукта на выходе из гидроциклона давление, показываемое манометром, установленным на входе в гидроциклон, представляет собой потенциальную энергию.

величину центробежной силы, влияющей на эффективность разделения. Обычно это давление изменяется от 0,5 до 5,0 кГ/см^2 .

На рис. 24 представлена зависимость производительности Q гидроциклона и мощности $N_{ср}$, затрачиваемой электродвигателем, от давления питания. (Гидроциклон диаметром 25 мм с углом конической части 20° .) С увеличением давления питания производительность возрастает примерно прямо пропорционально корню квадратному из величины давления.

Действие центробежной силы на частицу настолько велико по отношению действия силы тяжести, что последней можно прене-

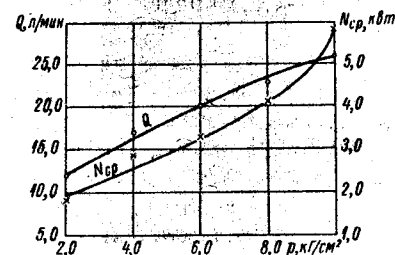


Рис. 24. Зависимость производительности гидроциклона и мощности, затрачиваемой электродвигателем, от давления питания

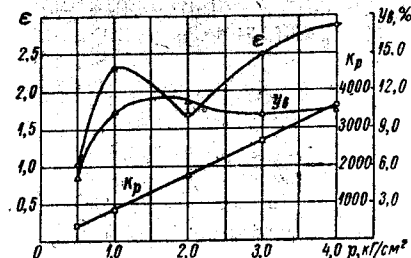


Рис. 25. Влияние давления питания на содержание легкой фазы в верхнем продукте, коэффициент обогащения и фактор разделения

бречь. Однако это справедливо только в случае работы гидроциклона при достаточном давлении питания. При низких давлениях (менее 0,5 кГ/см^2) или при больших диаметрах гидроциклонов влияние силы тяжести может оказаться весьма существенным.

Для гидроциклона, установленного вертикально, наиболее трудные для отделения легкие частицы должны подняться на высоту, равную расстоянию от нижнего выходного отверстия до нижней кромки диафрагмы. Поэтому давление питания должно быть достаточным для подъема легких частиц с восходящим потоком жидкости.

Таким образом, должен существовать какой-то нижний предел давления, при котором разделения фаз не будет. Для практических целей особенно важно установить нижний предел давления питания, при котором происходит хорошее разделение, так как повышенное давление приводит к повышенному расходу электроэнергии и преждевременному износу насоса.

Для гидроциклона диаметром 500 мм, установленного вертикально, давление питания должно быть не ниже 1 кГ/см^2 [26]. Одним из путей снижения давления питания на вводе без ухудшения разделения является установка гидроциклона в горизонтальном положении (или наклонном, близком к горизонтальному

положению), так как в этом случае действие сил тяжести оказывается менее значительным. Практика показывает, что в этом случае давление питания 0,5 кГ/см^2 вполне достаточно, чтобы получить хорошее разделение [9].

На рис. 25 показана зависимость процентного содержания легкой фазы в верхнем продукте и коэффициента обогащения от изменения давления питания для гидроциклона диаметром 45 мм, установленного вертикально ($\alpha = 10^\circ$, $h_1 = 45$ мм, $h_2 = 20$ мм, $d_o/d_n = 1,12$, разделяемый продукт — парафиновые шарики — вода). Оптимальным давлением, как видно из рис. 25, является давление питания 1,0 кГ/см^2 , так как при дальнейшем его снижении величина коэффициента обогащения и содержание парафиновых шариков в верхнем продукте резко снижаются.

Этому давлению питания соответствует величина фактора разделения k_p , равная 900, вычисленная по формуле (50), что позволяет установить оптимальную величину давления питания в зависимости от диаметра гидроциклона и фактора разделения. Значения последнего для различных исходных смесей, полученные из экспериментальных данных, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Величина оптимальных значений фактора разделения k_p для различных исходных продуктов

Исходный продукт	Характеристика легкой фазы		Содержание легкой фазы в исходном продукте в %	Фактор разделения k_p
	Плотность в г/см^3	Диаметр частиц в мм		
Проваренные в масле древесные опилки—вода	~0,95	<0,5	~5	300
Жир—вода	~0,94	<1,5	1—3	530
Парафиновые шарики—вода	~0,90	~1,0	~5	900

Таким образом, по характеристике исходного продукта (табл. 6) находится величина фактора разделения и по формуле (50) определяется величина оптимального давления питания (или диаметр гидроциклона).

Для нормального процесса разделения фаз в гидроциклоне следует учитывать не только давление питания, но также и его постоянство. Стабилизация давления обычно достигается подбором центробежного насоса соответствующей производительности или, что более правильно, поддержанием постоянного уровня в приемнике у насоса.

Неравномерность в подаче исходного продукта приводит к уменьшению производительности гидроциклона, повышению удельного расхода энергии и перегрузке отводных отверстий, что, в свою очередь, ухудшает эффективность разделения.

Содержание более легкой фазы в исходном продукте в пределах 5% не влияет на качество разделения.

Уменьшение значения коэффициента обогащения после достижения давления питания $1,0 \text{ кг/см}^2$ объясняется срывом работы гидроциклона, при котором начинается интенсивное подсосывание воздуха через нижнее отводное отверстие, достигающее максимального значения (для гидроциклона данной конструкции) при $p = 2,0 \text{ кг/см}^2$.

11. ДИАМЕТР ГИДРОЦИКЛОНА И ВЫСОТА ЕГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Диаметр гидроциклона является одним из важных геометрических размеров гидроциклона и определяет почти все остальные размеры. Так как величина центробежной силы обратно пропорциональна радиусу вращения, эффективность работы гидроциклона зависит от диаметра гидроциклона. Чем меньше диаметр гидроциклона, тем больше развивающиеся в нем центробежные силы и тем выше его разделительная способность.

Некоторое представление о зависимости производительности гидроциклона и нижней границы размеров частиц, поддающихся разделению, от диаметра гидроциклона дает табл. 7.

Таблица 7

Зависимость производительности гидроциклона и размера отделяемых частиц от диаметра гидроциклона

D в мм	Q в м ³ /ч	P в кг/см ²	δ в мк
15	0,24	2,0	—
25	0,96	2,0	—
45	1,17	2,0	—
76	2,73	2,8	5—20
203	27,30	2,1	20—40
356	62,80	2,1	100—325
610	273,00	1,4	325

Таблица 8

Зависимость производительности гидроциклона и коэффициента обогащения от высоты цилиндрической части
($D = 45 \text{ мм}$; $d_g = 7,2 \text{ мм}$;
 $d_n = 6,0 \text{ мм}$; $\alpha = 10^\circ$;
 $h_2 = 20 \text{ мм}$)

h_1 в мм	Q в м ³ /ч	ϵ	P в кг/см ²
45,0	0,570	1,90	0,5
24,5	0,548	1,70	
45,0	1,280	1,95	3,0
24,5	1,210	1,82	

Как уже указывалось выше, величина диаметра гидроциклона связана с другими геометрическими размерами, в частности с диаметром нижнего отводного отверстия. Величина последнего должна быть не менее чем в три раза больше максимального размера твердой частицы в разделяемом продукте [2, 28]. Это следует иметь в виду при определении диаметра гидроциклона.

Увеличение высоты цилиндрической части гидроциклона, так же как и уменьшение угла конической его части, увеличивает время пребывания обрабатываемого материала и повышает эффективность разделения.

Беднарский [19] считает, что высота цилиндрической части должна быть не меньше глубины погружения сливного патрубка внутрь гидроциклона, т. е. $h_1 \geq h_2$, а в некоторых случаях (в сгустителях и осветлителях) может достигать значения четырех диаметров гидроциклона.

В табл. 8 приведены результаты экспериментов по определению влияния высоты цилиндрической части гидроциклона на коэффициент обогащения и производительность.

Опыты производились на прозрачной модели диаметром 45 мм, исходный продукт — парафиновые шарики — вода.

Приведенные результаты различных исследований и данные табл. 8 позволяют сделать вывод, что для отделения легкой фазы высота цилиндрической части h_1 должна быть принята равной диаметру гидроциклона D , т. е.

$$h_1 = D. \quad (52)$$

12. КОНСТРУКЦИЯ ВЕРХНЕЙ РАЗГРУЗОЧНОЙ ЧАСТИ

Применяемые в настоящее время промышленные гидроциклоны имеют различную форму конструкции верхней разгрузочной части. Например, в гидроциклонах, выпускаемых Уфимским заводом горного оборудования [13], верхний продукт из цилиндрической части отводится непосредственно через сливной патрубок (аналогично гидроциклону, приведенному на рис. 3). Конструкция верхней части гидроциклонов, разработанных Гипросахаром [1] для очистки соков в сахарном производстве, имеет приемник для отвода верхнего продукта (см. рис. 4). Встречаются также конструкции гидроциклонов, где центральный цилиндрический стакан заменен отверстием равного диаметра в диафрагме.

Исследованиями Курбатова [9] доказано, что лучшим вариантом конструкции верхней части является гидроциклон с отводом верхнего продукта через цилиндрический стакан и приемник. В этом случае коэффициент разделения был несколько выше. При отсутствии стакана происходит частичное смешивание исходного продукта с отделившейся легкой фракцией.

Вопросами определения наиболее выгодных размеров формы верхней части занимался Беднарский [19], который рекомендует

Таблица 9

Размеры верхней части гидроциклона

Обозначение (см. рис. 23)	Величина размеров в долях диаметра		
	по данным Беднарского	по данным Гипросахара	по данным автора, рекомендуемые для отделения жира от воды
h_3	0,20—0,24	0,12—0,21	0,35—0,38
h_4	0,30—0,36	0,44—0,63	0,50—0,55
d_2	0,24—0,30	—	0,38—0,42
d_3	0,24—0,30	0,24—0,31	0,30—0,32
R_1	—	—	1,15—1,20
R_2	—	—	0,28—0,30
R_3	—	—	0,07—0,08

Примечание. Для обеспечения безударного входа исходной смеси и избежания образования мертвых зон и завихрений в верхней части гидроциклона введены радиусы скругления R_2 и R_3 , а для снижения скорости потока верхнего продукта и плавности его выхода — радиус R_1 .

производить отвод верхнего продукта через диафрагму и приемную камеру.

В табл. 9 приведены размеры верхней части гидроциклона.

Одним из основных размеров конструкции верхней части гидроциклона является глубина погружения h_2 диафрагмы в цилиндрическую часть гидроциклона. При малой величине погружения исходный продукт может попадать из входного отверстия непосредственно в диаграмму. Поэтому конец диафрагмы обязательно должен быть расположен несколько ниже входного отверстия.

Для выявления глубины погружения диафрагмы на эффективность разделения при отделении легкой фазы были поставлены опыты, результаты которых сведены в табл. 10.

Из приведенных данных следует, что производительность гидроциклона по верхнему продукту в зависимости от глубины погружения практически не изменяется. Максимальное значение коэффициента обогащения было достигнуто при глубине погружения 33 мм.

Учитывая, что высота цилиндрической зоны была равна 26 мм, можно сделать вывод о том, что для гидроциклона любого диаметра глубина погружения при отделении легкой фазы

$$h_2 = 1,2 \div 1,3h_1, \quad (53)$$

где h_2 — глубина погружения диафрагмы в цилиндрическую часть гидроциклона в мм;

h_1 — высота цилиндрической части гидроциклона в мм.

Таблица 10

Зависимость коэффициента обогащения и количества верхнего продукта от глубины погружения диафрагмы в цилиндрическую часть гидроциклона при различных давлениях питания
($D = 25$ мм, $d_g = 7,0$ мм, $d_n = 5,2$ мм, $h_1 = 26$ мм, исходный продукт керосин—вода)

P в кг/см ²	h_2 в мм	k	Q_g в л/мин	P в кг/см ²	h_2 в мм	k	Q_g в л/мин
8,0	22,1	1,07	18,23	4,0	22,1	1,06	13,36
	33,0	1,11	19,30		33,0	1,08	14,04
	44,0	1,10	18,36		44,0	1,06	13,78
6,0	22,1	1,01	15,77	2,0	22,1	1,00	9,63
	33,0	1,07	14,04		33,0	1,10	9,42
	44,0	1,04	16,90		44,0	1,06	10,16

13. ФОРМА И РАЗМЕРЫ ВХОДНОГО ОТВЕРСТИЯ

Размеры входного отверстия оказывают влияние на гидродинамический режим и производительность гидроциклона.

Скорости радиального и вращательного движения жидкостей в гидроциклоне, а следовательно, и количественные соотношения потоков, выходящих через отводные отверстия, в известной степени определяются величиной скорости в питающем патрубке.

При малом входном отверстии входная скорость разделяемого продукта будет большая, но количество продукта может быть незначительным. Если диаметр гидроциклона относительно велик или размеры отводных отверстий больше необходимых, скорости движения потоков в гидроциклоне будут значительно меньше.

При большом входном отверстии скорость у входа в гидроциклон будет меньше, но количество поступающего продукта будет значительным, поэтому приложенное давление окажется достаточным для преодоления сопротивления в гидроциклоне.

Для осуществления в гидроциклоне идеального винтового потока необходимы безударный вход исходной смеси и достаточный подвод энергии для создания и поддержания стабильного вихря. Потенциальная и кинетическая энергии, подводимые с продуктом, перераспределяются во вращающемся винтовом потоке в гидроциклоне, в котором тангенциальная линейная скорость в цилиндрической части и у вершины конуса, где поток меняет направление, находится в равновесии.

Для обеспечения безударного входа гидроциклон должен иметь такую геометрическую форму, чтобы входная и окружная скорости в цилиндрической части были равны. Это достигается

определенным соотношением размеров входного и верхнего отводных патрубков.

Исследования Келсалла [28] показали, что в гидроциклоне существует линейная зависимость между этими размерами.

Для поддержания стабильного вихря необходимо, чтобы кинетическая энергия потока была больше суммы энергии, расходуемой на трение, и потенциальной энергии.

Размеры входного отверстия определяются в зависимости от размеров гидроциклона и его отводных отверстий.

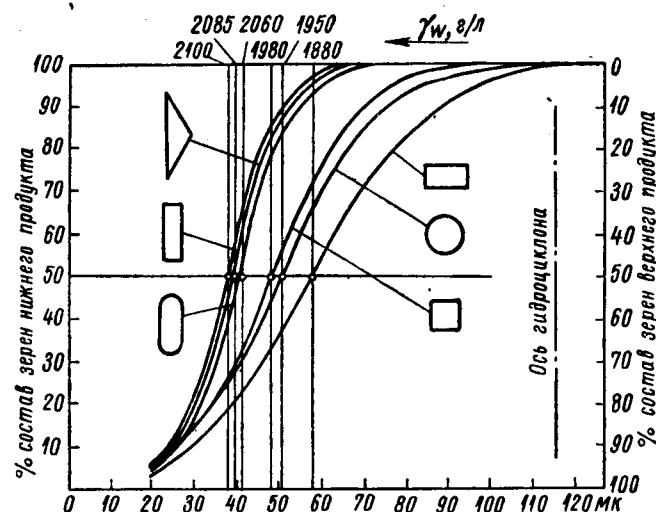


Рис. 26. Влияние формы входных отверстий на работу гидроциклона (по Беднарскому)

В различных конструкциях гидроциклонов диаметры входных отверстий колеблются в довольно широких пределах.

Для отделения жира от воды был сконструирован гидроциклон размером $d_n = 0,2D$ (правильность выбранного соотношения была подтверждена производственными испытаниями).

Влияние формы входных отверстий на производительность гидроциклона и эффективность разделения изучалось рядом авторов.

Наиболее подробные данные приведены Беднарским [19], который указывает, что прямоугольная форма входного отверстия (большая сторона параллельна оси гидроциклона) выгоднее, чем круглая, причем наиболее выгодное соотношение сторон $a : b = 0,33$. Лучшей является и эллиптическая форма отверстия с большой осью, параллельной оси гидроциклона.

На рис. 26 показано влияние формы входных отверстий на тонкость разделения, размеры отделяемых частиц и удельный вес

слива (верхнего продукта). Сечение входного отверстия во всех случаях одинаково ($d_n = \frac{1}{8} D$), содержание твердой фазы 1200 г/л, давление на входе в гидроциклон постоянное, удельный вес продукта γ_w изменялся в пределах 1880—2085 г/л.

Наибольшая производительность достигалась для вертикального прямоугольника (с отношением сторон 3 : 1), треугольника (равнобедренного с тупым углом, равным 120°) и эллипса (с отношением сторон 3 : 1), наименьшая — для горизонтального прямоугольника (с отношением 2 : 1).

Более высокая тонкость разделения, меньший удельный вес слива и меньший размер частиц также получались при входном отверстии, выполненном в форме вертикального прямоугольника.

Однако не рекомендуется сильно суживать входное отверстие из-за опасности его засорения. Наиболее подходящий прямоугольник для гидроциклонов диаметром 5—30 мм должен иметь отношение сторон $a : b = 0,6—0,4$, для диаметров 80—150 мм — от 0,4 до 0,25 и для больших — от 0,33 до 0,15. (Оптимум находится посередине интервала.)

При выборе ширины отверстия необходимо учитывать, что ее минимальное значение должно быть не менее чем в пять раз больше максимального размера частицы твердой фазы.

Исследованиями [12, 19] установлено, что на эффект разделения оказывает влияние также размещение входного отверстия на цилиндрической части корпуса. Ввод жидкости должен быть в самой верхней точке цилиндрической части корпуса гидроциклона во избежание образования «мертвого» пространства и накопления в нем более тяжелой фазы. Кроме того, на эффект разделения оказывает влияние угол сужения входного патрубка β и отношение сужения входного патрубка к сечению подводящего трубопровода.

Это отношение в зависимости от давления должно составлять (3—10) : 1, угол сужения не более 18° и не менее 10° (оптимум 13° 24'), а длина суженной части $c = 2a$.

Для направления продукта, подлежащего разделению, по пространственной раскручивающейся спирали и, следовательно, для уменьшения турбулентности и поддержания стабильного вихря целесообразно питающий патрубок с входным отверстием располагать под небольшим углом к перпендикуляру оси гидроциклона.

Наклон патрубка должен быть таким, чтобы входящий продукт за один оборот перемещался к вершине конуса гидроциклона на высоту входного отверстия (или его диаметр в случае круглой формы входного отверстия).

Угол ϕ определяется по формуле

$$\phi = \arctg \frac{b}{\pi D}, \quad (54)$$

где b — высота входного отверстия (или d_n при круглой форме входного отверстия) в мм.

Практически этот угол в гидроциклонах конструкции Гипро-сахара [1] и установленный автором для отделения жира от воды составляет 3—5°.

14. ДИАМЕТРЫ ВЕРХНЕГО И НИЖНЕГО ОТВОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ

Размеры верхнего и нижнего отводных отверстий оказывают значительное влияние на производительность гидроциклона и эффективность разделения.

Уменьшение размеров вызывает повышение сопротивления потоку жидкости, вследствие чего падает производительность гидроциклона.

На рис. 27 показана зависимость производительности гидроциклона от диаметра верхнего отводного отверстия, построенная для гидроциклона диаметром 45 мм с углом конуса 10° и давлением питания 2,0 кг/см². Производительность гидроциклона снижается при уменьшении верхнего отводного отверстия вследствие повышения сопротивления потоку входящего продукта.

Так как основная масса жидкости выходит из гидроциклона через верхнее отводное отверстие, то изменение диаметра нижнего отводного отверстия в оптимальных пределах оказывает незначительное влияние на производительность гидроциклона (рис. 28).

На рис. 29 приведена зависимость производительности гидроциклона от отношения диаметров верхнего и нижнего отводных отверстий, построенная для гидроциклона диаметром 45 мм с углом конуса 10° и диаметром входного отверстия 6 мм. Производительность гидроциклона также зависит от относительных размеров диаметра верхнего отводного отверстия и диаметра отверстия питания и возрастает с увеличением их соотношения.

Увеличение диаметра верхнего отводного отверстия приводит к ухудшению разделения (рис. 30). Объясняется это тем, что увеличение размеров верхнего отводного отверстия уменьшает время пребывания разделяемого продукта в гидроциклоне.

Увеличение диаметра нижнего отводного отверстия повышает эффективность разделения (рис. 31).

Изменения характера зависимости коэффициента обогащения от диаметра верхнего отводного отверстия при $d_n = 12,0$ мм (рис. 30) и от диаметра нижнего отверстия при $d_o = 9,0$ мм (рис. 31) объясняются интенсивным подсосыванием воздуха через нижнее отводное отверстие.

Оптимальные размеры отводных отверстий в гидроциклоне взаимосвязаны.

На рис. 32 показана зависимость коэффициента обогащения от отношения диаметров верхнего и нижнего отводных отверстий,

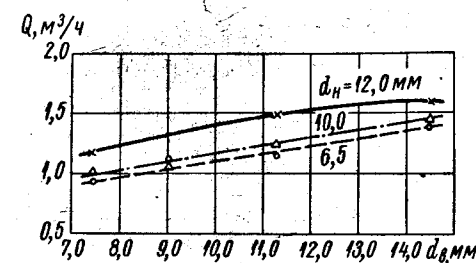


Рис. 27. Зависимость производительности гидроциклона от диаметра верхнего отводного отверстия при различных диаметрах нижнего отводного отверстия

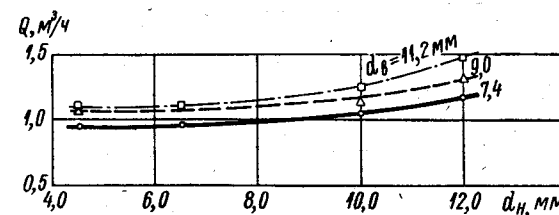


Рис. 28. Зависимость производительности гидроциклона от диаметра нижнего отводного отверстия при различных диаметрах верхнего отводного отверстия

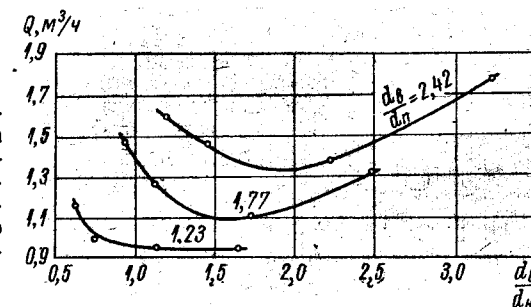


Рис. 29. Зависимость производительности гидроциклона от отношения диаметров отводных отверстий при различных соотношениях диаметров верхнего отводного отверстия и отверстия питания

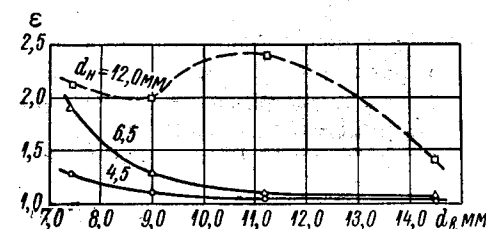


Рис. 30. Влияние диаметра верхнего отводного отверстия на коэффициент обогащения

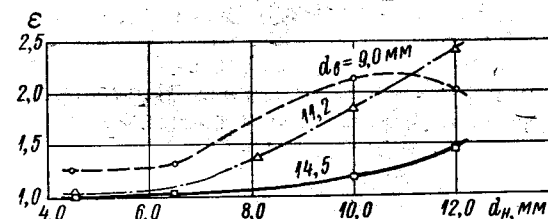


Рис. 31. Влияние диаметра нижнего отводного отверстия на коэффициент обогащения

построенная для трех разделяемых систем: пищевой жир—вода, парафиновые шарики—вода и керосин—вода. Из рисунка видно, что с уменьшением объемного веса более легкой фазы уменьшается это отношение.

Оптимальными величинами этих отношений являются: для системы жир—вода $d_0/d_n = 1,2 \div 1,4$; для системы парафиновые шарики—вода $d_0/d_n = 0,9 \div 1,1$; для системы керосин—вода $d_0/d_n = 0,6 \div 0,8$. Дальнейшее увеличение указанного соотношения приводит к уменьшению и коэффициента обогащения, и производительности гидроциклона.

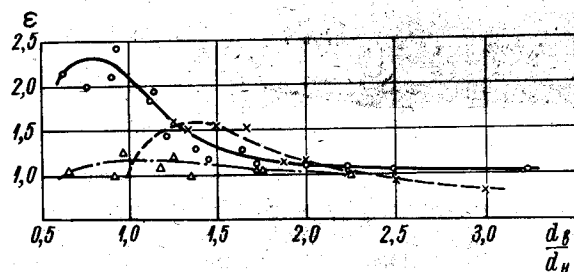


Рис. 32. Влияние отношения диаметров отводных отверстий на коэффициент обогащения для различных разделяемых систем:

— парафиновые шарики—вода; — — — жир—вода;
— · — · — керосин—вода.

Из рис. 31 и 32 видно, что изменение размеров нижнего отводного отверстия в оптимальных пределах практически не изменяет производительность гидроциклона, но оказывает значительное влияние на эффект разделения фаз.

Вследствие этого, а также из-за быстрой и легкой замены нижней насадки при работе гидроциклона размер нижнего отводного отверстия является основным параметром, изменением которого следует регулировать работу гидроциклона. При этом необходимо иметь в виду, что диаметр нижнего отводного отверстия не должен быть меньше трехкратного размера наибольшей частицы обрабатываемого материала во избежание опасности засорения отверстия.

15. УГОЛ КОНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ

Эффективность разделения фаз в гидроциклоне определяется не только величиной радиального ускорения, но и временем пребывания в нем разделяемого продукта.

При уменьшении угла конической части гидроциклона увеличиваются его емкость и время пребывания в нем обрабатываемого продукта, что приводит к повышению эффективности разделения.

Пантофличек [29] указывает, что с уменьшением величины угла конуса увеличивается производительность гидроциклона и улучшается его разделяющая способность, и рекомендует $\alpha = 10 \div 15^\circ$.

Модер и Дальстром [12] также считают оптимальным значением угол в 15° и указывают, что дальнейшее уменьшение угла не оказывает значительного влияния на эффективность разделения.

Автором были проведены опыты на системе парафиновые шарики—вода на прозрачной модели гидроциклона диаметром 45 мм с углами конуса 10, 20 и 30° . Результаты экспериментов полностью подтверждают выводы указанных выше исследователей.

На рис. 33 показана зависимость производительности гидроциклона и коэффициента обогащения от угла конической части.

Для обогащения легкой фазы следует принимать угол конуса 10° , так как дальнейшее уменьшение α приводит к значительному увеличению высоты гидроциклона.

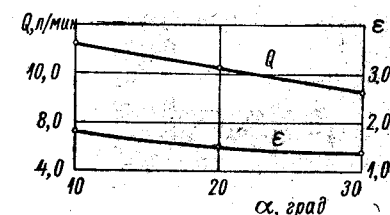


Рис. 33. Зависимость производительности гидроциклона и коэффициента обогащения от угла конической части

Глава IV

РАСЧЕТ ГИДРОЦИКЛОНОВ

16. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОЦИКЛОНА

Технологический расчет гидроциклона для отделения легкой фазы, находящейся в воде в небольшом количестве (порядка 5%), сводится к определению производительности гидроциклона, работающего при оптимальных геометрических параметрах, соответствующих максимальному значению коэффициента обогащения.

Производительность гидроциклона зависит от давления питания на входе в гидроциклон и ряда его геометрических параметров, основными из которых являются диаметр гидроциклона, размеры входного отверстия, диаметры отводных отверстий и угол конической части.

Производительность гидроциклона определяется:

при рассмотрении гидроциклона как местного сопротивления на трубопроводе;

на основе общей формулы истечения из затопленного отверстия;

на основе общей формулы истечения через водослив, образованный краями верхнего отводного отверстия.

Однако расчетные формулы, получаемые на основе каждой из указанных предпосылок, идентичны.

Для определения производительности гидроциклона был предложен ряд формул.

Рассматривая гидроциклон как местное сопротивление на трубопроводе, Циперович и Долинский [16] предложили следующую формулу для определения производительности гидроциклона:

$$Q = 2,4 f_c \frac{r_n}{r_c} \sqrt{2gH} \text{ м}^3/\text{сек}, \quad (55)$$

где f_c — площадь сечения входного отверстия в м^2 ;

r_n — радиус верхнего отводного отверстия в м ;

r_c — средний радиус гидроциклона в м ;

2,4 — коэффициент, учитывающий потери напора на трение в гидроциклоне и зависящий от формы и размеров гидроциклона;

H — напор на входе в гидроциклон в м вод. ст.

Модером и Дальстромом [12] для определения объемной производительности гидроциклона предложена следующая эмпирическая формула:

$$Q = k (d_n d_o)^{0,9} \sqrt{\Delta H}, \quad (56)$$

где Q — производительность гидроциклона в л/мин ;

d_n и d_o — диаметры отверстия питания и верхнего отводного отверстия в см ;

ΔH — перепад давления между питающим и верхним отводным патрубком в м вод. ст. ;

k — коэффициент пропорциональности, зависящий главным образом от формы гидроциклона и отношения диаметров верхних и нижних отводных отверстий.

Постоянная k при угле конической части гидроциклона 15° и высоте цилиндрической части, равной двум диаметрам гидроциклона, определяется по следующим формулам:

при $d_o/d_n = 0,75 \div 1,0$

$$k = 6,2e^{0,00537V};$$

при $d_o/d_n = 1,25 \div 1,35$

$$k = 7,16e^{0,00234V};$$

при $d_o/d_n = 1,68 \div 2,11$

$$k = 6,85e^{0,00163V},$$

где e — основание натуральных логарифмов;

V — количество нижнего продукта в % (по объему).

Курбатов [9] предлагает определять объемную производительность по формуле

$$Q = 12500 k_c \mu d_n^2 \sqrt{p} \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (57)$$

где k_c — коэффициент сопротивления, зависящий от отношения диаметров верхнего отводного отверстия и отверстия питания;

μ — коэффициент расхода, зависящий от угла конуса патрубка питания (максимальное значение $\mu = 0,945$ соответствует углу конуса $13^\circ 24'$);

d_n — диаметр входного отверстия в м ;

p — давление на входе в м вод. ст.

Производительность гидроциклона можно также определить по количеству жидкости, протекающей через входное отверстие, аналогично случаю истечения жидкости из затопленного отверстия

$$Q = \mu_1 d_n \sqrt{\Delta H} \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (58)$$

где d_n — диаметр входного отверстия в см ;

ΔH — перепад давления между питающим и верхним отводным патрубком в кг/см^2 ;

μ_1 — коэффициент расхода жидкости (для известкового молока $\mu_1 = 1,53$).

Исходя из общей формулы истечения жидкости из затопленного отверстия, Поваров [14] вывел уравнение

$$Q = k D d_o \sqrt{gH} \text{ л/мин}, \quad (59)$$

где D и d_o — диаметры гидроциклона и верхнего отводного отверстия в см ;

g — ускорение силы тяжести в м/сек^2 ;

H — давление питания в кг/см^2 .

Коэффициент производительности k не зависит от размера гидроциклона, диаметров верхнего и нижнего отводных отверстий и давления питания, а зависит главным образом от относительной величины входного отверстия и угла конической части гидроциклона.

Величина коэффициента k определяется в зависимости от отношения диаметра входного отверстия к диаметру гидроциклона.

По данным Поварова, для гидроциклонов диаметром 125—600 мм с $\alpha = 38^\circ$ величина $k = 0,524$.

Честон [20] предложил упрощенную формулу для расчета (точностью $\pm 20\%$) производительности гидроциклонов

$$q = KA \sqrt{p}, \quad (60)$$

где q — производительность гидроциклона в американских галлонах;

A — площадь входного отверстия в кв. дюймах;

p — давление питания в фунт/кв. дюйм.

Он определил, что значение k находится в пределах от 10 до 15.

Если принять $k = 10,7$ (по данным Ангелова [3], проверявшего формулу Честона) и перевести формулу в метрическую систему, то она примет вид

$$q = 23,6A \sqrt{p}, \quad (61)$$

где q — в л/мин; A — в см²; p — в кг/см².

Анализ всех вышеприведенных формул показывает, что они могут быть представлены формулой следующего вида:

$$Q = \psi F \sqrt{2gH} \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (62)$$

где F — площадь входного отверстия гидроциклона в м²;
 H — рабочий напор идеального гидроциклона, т. е. разность между полным напором на входе в гидроциклон и потерей напора внутри гидроциклона, в м;
 ψ — коэффициент, учитывающий влияние отклонения величины действительной скорости от теоретической.

На основании расчета, произведенного по различным формулам, колебание величины расхода при одних и тех же условиях питания и одинаковых геометрических размерах гидроциклона находится в пределах от среднего значения ($\psi = 1495$), взятого по максимуму и минимуму 32,8 и 29,6%.

Следует отметить, что по предлагаемой формуле (63) значение расхода оказывается близким к среднему. Отклонение от среднего составляет 4,5%.

Проверка применимости формул для определения производительности гидроциклонов при отделении более легкой фазы дала следующие результаты (табл. 11).

Формулы (55) и (57) дают примерно одинаковые отклонения от фактической производительности для гидроциклонов всех размеров. Наименьшие отклонения от фактической производительности для гидроциклонов 75 мм (и более) дает формула (59), но она непригодна для гидроциклонов меньших размеров. Формулы (58) и (61) применяются при ориентировочных расчетах производительности гидроциклонов, когда не требуется большой степени точности.

Нами предложена следующая эмпирическая формула для расчета производительности гидроциклона:

$$Q = 3600kDd_s \sqrt{gH}, \quad (63)$$

где Q — объемная производительность гидроциклона в м³/ч;
 D — диаметр гидроциклона в м;
 d_s — диаметр верхнего отводного отверстия (диафрагмы) в м;
 H — давление на входе в гидроциклон в м вод. ст.;
 g — ускорение силы тяжести в м/сек²;
 k — коэффициент производительности.

Производительность гидроциклонов, вычисленная по формулам, предложенным разными исследователями, и ее отклонение от фактической

Характеристика гидроциклонов и разделяемый исходный продукт	Фактическая производительность в м ³ /ч	Производительность в м ³ /ч						
		Отклонения от фактической производительности в %						
		Номер формул						
		55	56	57	58	59	61	63
$D = 75 \text{ мм}; d_n = 15 \text{ мм}; d_s = 10 \text{ мм}; d_g = 15 \text{ мм}; \alpha = 20^\circ; p = 0,5 \text{ кг/см}^2$ Вода—промасленные опилки	1,52	2,67	1,34	2,27	2,44	1,50	1,76	1,64
		17,5	11,6	14,9	16,0	1,2	11,6	8,0
$D = 75 \text{ мм}; d_n = 15 \text{ мм}; d_s = 12 \text{ мм}; d_g = 20 \text{ мм}; \alpha = 20^\circ; p = 0,5 \text{ кг/см}^2$ Жир—вода	2,31	3,35	2,04	3,13	2,44	2,0	1,76	2,49
		14,5	11,6	13,5	5,5	13,5	23,6	7,5
$D = 45 \text{ мм}; d_n = 6 \text{ мм}; d_s = 10 \text{ мм}; d_g = 11,2 \text{ мм}; \alpha = 20^\circ; p = 1,0 \text{ кг/см}^2$ Парафиновые шарики—вода	0,84	0,70	0,66	0,71	0,55	0,66	0,40	0,86
		17,2	21,0	16,4	34,6	21,5	52,3	2,5
$D = 25 \text{ мм}; d_n = 6 \text{ мм}; d_s = 5,2 \text{ мм}; d_g = 7 \text{ мм}; \alpha = 20^\circ; p = 2,0 \text{ кг/см}^2$ Керосин—вода	0,72	1,12	0,55	0,99	0,78	0,55	0,56	0,92
		15,4	13,2	13,7	7,7	23,4	22,6	12,7

Безразмерный коэффициент производительности k в этой формуле характеризует конструкцию гидроциклона. Его значение не зависит от диаметра гидроциклона, диаметра верхнего отводного отверстия и давления на входе в гидроциклон.

Изменение диаметра нижнего отводного отверстия, производимое для регулирования процесса разделения, фактически не влияет на производительность (см. гл. III).

Уравнение (63) неудобно в том отношении, что коэффициент k зависит от относительной величины размеров отверстия питания, но для определенного ряда геометрически подобных гидроциклонов разных диаметров с одинаковым отношением d_n/D этот коэффициент остается постоянным.

На величину коэффициента производительности влияет также угол конуса гидроциклона (см. гл. III).

Экспериментами, проведенными в Ленинградском институте «Механобр» [14], установлено, что для гидроциклонов с углом конуса, не равным 20° , в формулу (63) должна быть введена поправка в виде множителя $\frac{0,81}{\alpha^{0,2}}$, где α — угол конусности, выраженный в радианах. Например, для гидроциклонов с $\alpha = 10^\circ$ величина этого множителя составляет 1,15.

Средние значения коэффициента производительности k для различных разделяемых исходных продуктов, полученные из опытных данных, составляют:

Исходный продукт	α в град	k
Жир—вода	20	0,066
Керосин—вода	20	0,084
Парафиновые шарики—вода	20	0,035
» » »	10	0,040

Значения коэффициента k , полученные при разделении системы парафиновые шарики — вода для гидроциклонов с $\alpha = 10$ и 20° , полностью подтверждают поправку, предложенную Ленинградским институтом «Механобр», которую необходимо вводить, если $\alpha \neq 20^\circ$. Таким образом, для гидроциклона, предназначенного для отделения жира от воды, с $\alpha = 10^\circ$ после подстановки в формулу (63) численных значений $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$, $k = 0,066$ и введения поправки на угол конуса 1,15 получаем более простую расчетную формулу

$$Q = 850 D d_n \sqrt{H}. \quad (64)$$

17. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ГИДРОЦИКЛОНА

Определение диаметра гидроциклона и размеров входного отверстия

Необходимое количество гидроциклонов для заданной производительности, диаметр гидроциклона и размеры входного отверстия ориентировочно определяются по формуле (61), которую после перевода ее в принятые нами размерности запишем

$$Q = 4400 F \sqrt{H}, \quad (65)$$

где Q — в $\text{м}^3/\text{ч}$;
 F — в м^2 ;
 H — в м вод. ст.
 Отсюда находим

$$F = \frac{Q}{4400 \sqrt{H}}. \quad (66)$$

Если входное отверстие круглое (или если принять его условно за круглое), то диаметр

$$d_n = 0,017 \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt{H}}. \quad (67)$$

Диаметр гидроциклона принимаем $D = 5 d_n$.

Если гидроциклон получается больших размеров и необходимо заменить его несколькими гидроциклонами меньшего диаметра, то следует исходить из уравнения

$$F = \frac{\pi \left(\frac{d_n}{m}\right)^2}{4} n = \frac{\pi d_n^2}{4} \cdot \frac{n}{m^2},$$

откуда

$$\frac{n}{m^2} = 1,$$

т. е.

$$m = \sqrt{n}, \quad (68)$$

где m — отношение диаметров большего и меньшего гидроциклонов;

n — число гидроциклонов меньшего размера.

Задавшись n , определим m , d'_n и D' .

Наиболее выгодной формой входного отверстия является прямоугольник со следующим отношением ширины a к высоте b :
 при $D = 5 \div 30 \text{ мм}$

$$a : b = 0,6 \div 0,4;$$

при $D = 80 \div 150 \text{ мм}$

$$a : b = 0,4 \div 0,25;$$

при $D = 150 \text{ мм}$ и более

$$a : b = 0,33 \div 0,15.$$

Задавшись соответствующим отношением сторон, определим их размеры из выражения

$$ab = \frac{\pi d_n^2}{4}.$$

Если ширина входного отверстия a будет меньше пятикратного размера наиболее крупной отделяемой частицы, следует увеличить диаметры гидроциклонов, иначе может произойти забивание отверстия питания. Входное отверстие должно быть размещено в верхней точке цилиндрической части корпуса гидроциклона.

Угол сужения входного патрубка $\beta = 13^\circ 24'$, длина узкой части $s = 2a$.

Угол наклона патрубка питания к горизонту находим по формуле (54).

Определение диаметров верхнего и нижнего отводных отверстий

Диаметр верхнего отводного отверстия гидроциклона, предназначенного для отделения жира от воды и имеющего $\alpha = 10^\circ$ (это оптимальное значение угла конуса для системы жир—вода), определим из формулы (64)

$$d_o = \frac{Q}{850D \sqrt{H}} \quad (69)$$

При заданной производительности Q (если установлено несколько параллельно работающих гидроциклонов, следует подставлять значение производительности Q/n) и установленном D оптимальную величину найдем из уравнения (50)

$$H = \frac{k_p D}{4}, \quad (70)$$

в котором для системы жир—вода по нашим подсчетам $k_p = 530$.

Диаметр нижнего отводного отверстия определяется из отношения $d_o/d_n = 1,2 \div 1,4$. При этом необходимо иметь в виду, что во избежание возможного забивания отверстия величина d_n не должна быть меньше трехкратного размера наибольшей частицы обрабатываемого материала.

Определение вспомогательных размеров гидроциклона

Вспомогательные линейные размеры гидроциклона (см. рис. 23) определяются по табл. 12.

П р и м е р. Определить размеры гидроциклона по следующим исходным данным.

Количество исходного продукта $5,0 \text{ м}^3/\text{ч}$, давление на входе в гидроциклон $1,0 \text{ кг/см}^2$, максимальная крупность кусочков кости $2,0 \text{ мм}$. Гидроциклон предназначен для отделения костного жира от воды, уходящей в канализацию.

Таблица 12

Вспомогательные размеры
для конструирования гидроциклонов

Обозначение	Величина размеров в долях D	Обозначение	Величина размеров в долях D
h_1	1,0	d_2	0,38—0,42
h_2	1,2—1,3	d_3	0,30—0,32
h_3	0,35—0,38	R_1	1,15—1,20
h_4	0,50—0,55	R_2	0,28—0,30
		R_3	0,07—0,08

$$d_n = 0,017 \frac{\sqrt{q}}{\sqrt[4]{H}} =$$

$$= 0,017 \frac{\sqrt{5,0}}{\sqrt[4]{10}} = 0,021 \text{ м.}$$

Диаметр гидроциклона
 $D = 5d_n = 5 \cdot 21 = 105 \text{ мм.}$

Определим размеры входного прямоугольного отверстия, учитывая, что наивыгоднейшее соотношение сторон $a : b = 0,4$

$$0,4b^2 = \frac{\pi d_n^2}{4};$$

$$b = \sqrt{\frac{\pi d_n^2}{1,6}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot 21^2}{1,6}} = 29,4 \text{ мм};$$

$$a = b \cdot 0,4 = 11,8 \text{ мм.}$$

Принимаем размеры входного отверстия $a = 12 \text{ мм}$ и $b = 29 \text{ мм}$.

Так как максимальный размер кусочков кости, попадающих в гидроциклон, 2 мм , то условие незабиваемости входного отверстия удовлетворяется ($2 \cdot 5 < a$).

Длина суженной части

$$c = 2a = 2 \cdot 12 = 24 \text{ мм.}$$

Оптимальный угол сужения $\beta = 13^\circ 24'$.

Угол наклона входного патрубка

$$\varphi = \arctg \frac{b}{\pi D} = \arctg \frac{29}{\pi \cdot 105} = 3^\circ 30'.$$

Определим диаметр верхнего отводного отверстия

$$d_o = \frac{Q}{850D \sqrt{H}} = \frac{5,0}{850 \cdot 0,105 \sqrt{10}} = 0,0178 \text{ м};$$

принимаем $d_o = 18 \text{ мм}$.

Диаметр нижнего отводного отверстия

$$d_n = \frac{d_o}{1,4} = \frac{18}{1,4} = 12,8 \text{ мм};$$

принимаем $d_n = 13 \text{ мм}$.

Размер d_n удовлетворяет условию незабиваемости нижнего отводного отверстия ($3 \cdot 2 < d_n$).

Определим вспомогательные конструктивные размеры гидроциклона по табл. 12:

$$h_1 = 105 \text{ мм}; \quad d_2 = 40 \text{ мм};$$

$$h_2 = 130 \text{ мм}; \quad d_3 = 37 \text{ мм};$$

$$h_3 = 38 \text{ мм}; \quad R_1 = 125 \text{ мм};$$

$$h_4 = 55 \text{ мм}; \quad R_2 = 30 \text{ мм};$$

$$R_3 = 8 \text{ мм.}$$

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГИДРОЦИКЛОНОВ

18. МОНТАЖ И НАЛАДКА ГИДРОЦИКЛОНОВ

При монтаже гидроциклонной установки необходимо соблюдать условия, обеспечивающие стабильность и бесперебойность ее работы.

Сборник должен вмещать такое количество исходного продукта, которое обеспечило бы не менее чем получасовую работу установки. Чем больше емкость сборника, тем лучше поддерживается стабильный режим работы установки независимо от некоторых неизбежных в производственных условиях колебаний количества продукта.

При правильной компоновке установки наладка сводится к обеспечению стабильного давления исходного продукта, зонтообразной разгрузки нижнего продукта, а также к обеспечению нормальной работы насоса. Если при выборе гидроциклонов и их монтаже были допущены какие-либо ошибки, то в процессе наладки они должны быть выявлены и устранены.

Необходимая величина давления питания и его стабилизация достигаются обычно подбором и установкой центробежного насоса с производительностью, соответствующей производительности гидроциклона, или поддержанием постоянного уровня исходного продукта в сборнике, если питание гидроциклона осуществляется самотеком. При слишком большой производительности насоса по сравнению с фактическим количеством исходного продукта, проходящим через него, питание поступает в гидроциклон толчками (насос периодически то выкачивает весь исходный продукт, накопившийся в сборнике, причем давление возрастает до максимума, то прекращает подачу, когда в него засасывается воздух), что приводит к резкому ухудшению эффективности разделения.

Устранение пульсации в питании можно иногда осуществить изменением размеров нижнего отводного отверстия и отверстия питания (в оптимальных пределах без ухудшения эффективности разделения). В этом случае размеры указанных отверстий подбираются таким образом, чтобы за счет увеличения сопротивлений повысить давление на входе в гидроциклон до величины, при которой производительность, развиваемая насосом, будет близка к производительности по исходному продукту, подаваемому в гидроциклон для разделения.

Для обеспечения постоянства давления питания применяют также установку задвижек на напорном или всасывающем трубопроводе насоса или возвращают часть исходного продукта обратно в сборник. Установка регулирующей и запорной арматуры на трубопроводах верхнего и нижнего продуктов недопустима, так

как изменение распределения выходящих продуктов может резко ухудшить работу гидроциклона.

Причиной частых перебоев в работе гидроциклонов бывает недостаточная предварительная очистка исходного продукта от крупных частиц, попадание которых в гидроциклон приводит к забиванию отверстия питания или отверстия для отвода нижнего продукта. Для предотвращения этого необходимо устанавливать

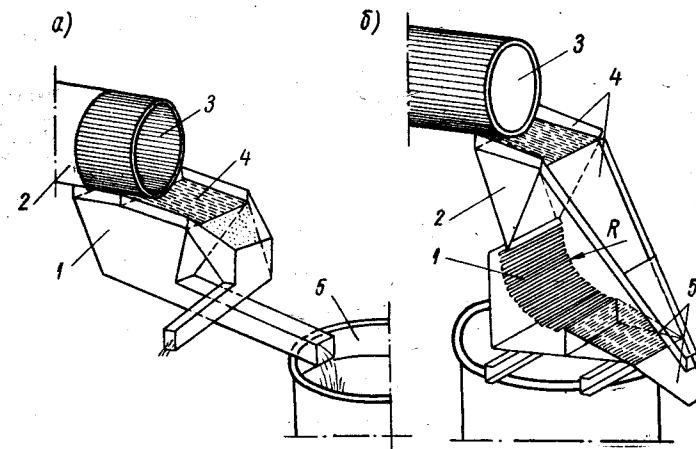


Рис. 34. Способы предварительной очистки исходного продукта

на всасывающем трубопроводе насоса сетчатый фильтр (размеры ячейки сит определяются в зависимости от размеров гидроциклонов, см. гл. III).

Применяются два способа предварительной очистки исходного продукта перед подачей его на гидроциклоны [5]: на щелевом сите и на дугообразном сите.

На рис. 34, а показан первый способ. К наружной стенке сборника исходного продукта 2 присоединено круглое щелевое сито 3 трапецеидального сечения длиной 500—800 мм. Исходный продукт с мелкими загрязнениями протекает через поверхность сита в сборный желоб 1, оставляя на нем более крупные примеси, которые падают на лист 4, и после предварительной очистки стекает в промежуточный бачок 5, откуда насосом подается в гидроциклон. Вместо щелевого сита можно применять и другие типы сит; при этом необходимо, чтобы ширина щели сита или диаметр отверстий жести соответствовал размерам отверстий питания и отвода нижнего продукта. Желоб 1 и промежуточный бачок 5 рекомендуется устанавливать таким образом, чтобы обслуживающий персонал не имел доступа к ним.

На рис. 34, б показана предварительная очистка исходного продукта на дугообразном сите. Загрязненный продукт стекает

из сборника 3 на перфорированную жесьть 4 с отверстиями, откуда уже частично очищенный продукт попадает в короб 2, а затем стекает на дугообразное сито 1 с радиусом дуги $R \approx 500$ мм. Более крупные загрязнения отбрасываются и направляются в желоб 5, который соединяется с наклонным желобом. Дно желоба 5 над сборным лотком изготавливается из жести с диаметром отверстий в три раза меньшим, чем из перфорированной жести, для дальнейшего отделения жидкости от загрязнений. Расстояние между колосниками дугообразного сита 1, имеющими трапецеидальное сечение, должно быть в два раза меньше диаметра отверстий перфорированной жести. Дуговые сита отличаются высокой пропускной способностью и большим сроком службы (до 12 000 ч).

19. КОНТРОЛЬ И РЕГУЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГИДРОЦИКЛОНОВ

Контроль за работой гидроциклонов производится по манометрам, устанавливаемым обычно на напорных трубопроводах. Для обеспечения надежности действия манометры должны быть установлены так, чтобы в них не мог попасть разделяемый продукт. По показаниям манометра контролируется объемная производительность.

Если поддерживается питание постоянным по количеству, никакого регулирования работы гидроциклона после наладки не требуется. Если устранить колебания питания затруднительно, следует применять регулирование (вручную или автоматическое).

Регулирование вручную производится изменением диаметра нижнего отводного отверстия. При работе со сменными насадками, закрепляемыми гайками или фланцами, регулирование получается ступенчатым, причем обычно гидроциклоны выключаются из работы, а при работе с резиновыми затворами возможно осуществлять плавное регулирование на ходу.

Неполадки при работе гидроциклона связаны главным образом с их забиванием. Если прекращается выход нижнего продукта, а выход верхнего продукта продолжается, при этом манометр, установленный на питающем трубопроводе, показывает прежнее давление, значит забито нижнее отводное отверстие.

Прекращение выхода верхнего продукта или резкое уменьшение его при изменившихся показателях давления на манометре является следствием забивания отверстия питания.

Если стрелка манометра неподвижно стоит на нуле или в каком-либо ином положении при неизменившемся выходе обоих продуктов, то манометр испорчен или забит.

Периодическое изменение давления питания (увеличение до максимума, а затем падение до нуля) указывает на то, что насос работает толчками и его работу необходимо отрегулировать.

Падение давления связано иногда с засасыванием воздуха в насос через износившийся сальник.

Автоматическое регулирование работы гидроциклонов основано на изменении вакуума в воздушном столбе в зависимости от изменения количества выходящего нижнего продукта.

Вакуум зависит от количества питания и давления в питающем патрубке, а при постоянстве этих параметров — от диаметра нижнего отводного отверстия и в особенности от всасыва-

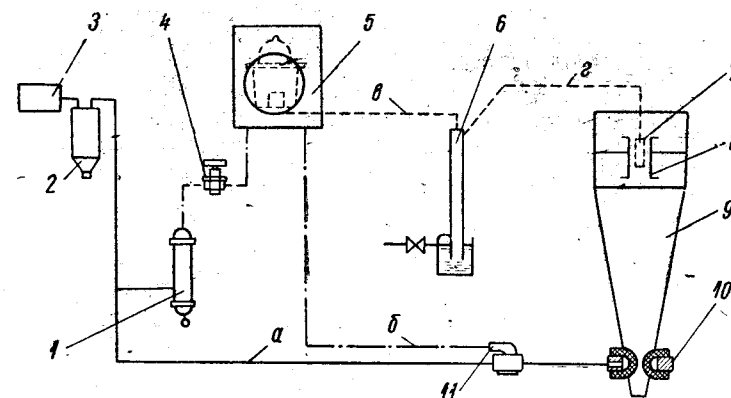


Рис. 35. Схема установки автоматического регулирования гидроциклона

ющего действия верхней отводной трубы. Если подсос воздуха через эту трубу велик, то вакуум в воздушном столбе приближается к нулю.

Таким образом, открытая отводная труба неприемлема для регулирования по вакууму в воздушном столбе.

При наличии гидрозатвора подсос воздуха через отводную трубу прекращается и может подсасываться в гидроциклон только через нижнее отводное отверстие. Если диаметр отверстия слишком мал, то воздушный столб снизу перекрывается выходящим продуктом и подсос воздуха прекращается, отчего вакуум резко увеличивается. Такой режим работы с постоянным большим вакуумом непригоден для автоматического регулирования. Если диаметр нижнего отводного отверстия d_n имеет достаточный размер и воздушный столб сообщается с атмосферой, причем струя выходящего из гидроциклона нижнего продукта имеет зонтообразный вид со свободной центральной частью, через которую подсасывается воздух, величина вакуума закономерно связана с количеством нижнего продукта. Этот режим является наиболее пригодным для автоматического регулирования по вакууму.

При автоматическом регулировании по системе Дорра (рис. 35) гидроциклон 9 снабжается насадкой 10 в виде гибкой резиновой

манжеты, изображенной на рис. 7, г. В кольцевую камеру манжеты подается сжатый воздух из пневматического вентиля 11, который присоединен к воздухопроводу а сжатого воздуха и воздухопроводу б для «контрольного воздуха», посылаемого в вентиль 11 регулирующим прибором 5. Измерительный регулирующий прибор 5 соединен в трубке в с вакуумметром 6, а последний через трубопровод г соединен с контрольной трубкой 7, введенной внутрь диафрагмы 8.

Сжатый воздух, подаваемый компрессором 3, проходит через отстойник 2 и направляется непосредственно в пневматический вентиль 11, а также через воздушный фильтр 1 и редуктор 4 на прибор 5.

Изменение вакуума в диафрагме 8, а следовательно, в трубке 7, передается по трубке г на вакуумметр 6, а отсюда по трубке в — на прибор 5. В приборе 5 показания вакуумметра 6 преобразуются в командные импульсы, подаваемые в вентиль 11 и отсюда на насадку 10.

По аналогичному принципу работает система автоматического регулирования гидроциклона, разработанная в Ленинградском институте «Механобр» на базе стандартных приборов, выпускаемых отечественной промышленностью.

20. РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Эксплуатационные расходы при работе гидроциклонов сводятся главным образом на затраты энергии и обслуживание. Расход энергии при работе гидроциклонов может изменяться в широких пределах в зависимости от давления питания и схемы компоновки установки.

С увеличением давления питания потребление энергии гидроциклонами сильно возрастает. В зависимости от способа питания гидроциклона энергия, потребляемая им, представляет либо энергию падающего исходного продукта, если питание производится самотеком, либо электроэнергию, расходуемую на работу электродвигателя насоса, если продукт подается насосом.

Следовательно, если имеется возможность установить гидроциклон ниже источника питания с достаточным для его работы перепадом по высоте, затраты на энергию отпадают. Потребление энергии насосами рассчитывается по нагрузке. Нагрузка на насос определяется объемной производительностью, плотностью исходного продукта, напором, требующимся для создания необходимого давления питания, и напором для преодоления трения в трубопроводе и местных сопротивлений.

Удельный расход энергии на 1 м³ исходного продукта, обрабатываемого в гидроциклоне, при питании от насоса зависит в основном от общего напора.

Проведенные в 1964 г. на Ленинградском клеевом заводе испытания конического гидроциклона, предназначенного для отделения жира от воды и входящего в полупроизводственную установку для гидромеханического обезжиривания кости, показали, что при оптимальном режиме работы гидроциклона средний удельный расход электроэнергии $\sim 0,25 \text{ квт} \cdot \text{ч/м}^3$ исходного продукта.

Глава VI

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОЦИКЛОНОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

21. ПРОМЫШЛЕННАЯ УСТАНОВКА ГИДРОЦИКЛОНОВ ДЛЯ ОТДЕЛЕНИЯ ЖИРА ИЗ ОТРАБОТАННОЙ ВОДЫ

Процесс выделения жира из отработанной воды при внедрении гидромеханического метода извлечения костного жира на Ленинградском мясокомбинате был интенсифицирован путем гидроциклонирования жироводной смеси с окончательным отделением легкой жировой фазы в специальных отстойниках непрерывного действия.

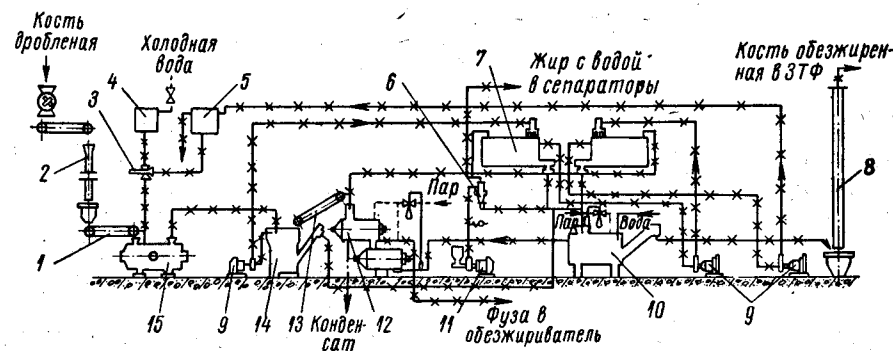


Рис. 36. Принципиальная схема гидромеханической установки ГМУ-2000

Комбинация гидроциклонов и непрерывно действующего отстойника была названа деэмульгатором.

Деэмульгаторы являются одним из основных аппаратов гидромеханической установки ГМУ-2000. Она установлена в технологическую линию автоматизированного жирового цеха Ленинградского мясокомбината им. С. М. Кирова [11].

На рис. 36 приведена принципиальная схема ГМУ-2000.

Дробленая кость поступает по спуску 2 через весовой питатель 1 в гидромеханическую машину 15. Количество подаваемой в гидромеханическую машину чистой холодной воды из бака 4 и обезжиренной рабочей воды из бака 5 устанавливается трехходовым краном 3. Смесь кости, воды и жира направляется в разделитель 14, откуда жиромасса подается скребковым транспортером 13 в приемный бункер плавителя 12, туда же следует жиромасса из деэмульгаторов 7. Все жидкие фракции, содержащие жир, поступают в сборник 11. Освобожденный в гидроциклоне 6 от

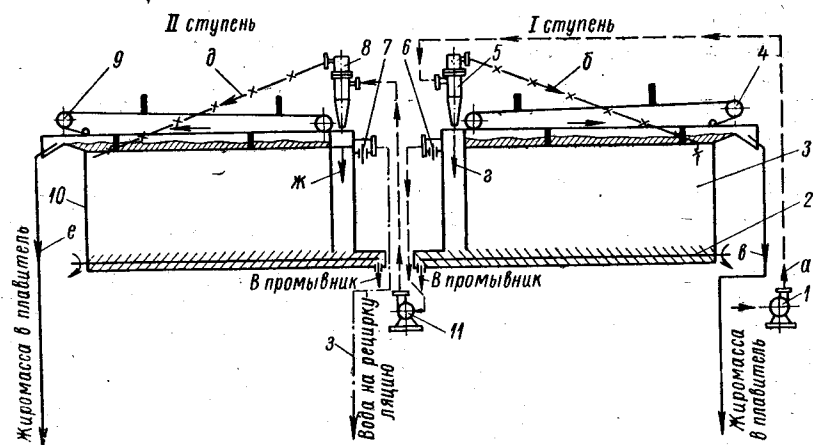


Рис. 37. Технологическая схема двухступенчатого деэмульгирования и выделения жира из отработанной воды:

— — — — — кость; — — — — — продукт; — — — — — вода;
— x — x — — — — — обогащенный продукт

мельчайших частиц кости жир с водой направляется на сепарирование. Рабочая вода, содержащая до 1,0% жира, насосом 9 направляется на деэмульгаторы 7 для обезжиривания. Обезжиренная кость направляется в промывник 10 и после промывки поступает на норию 8 для подачи на производство клея.

Технологическая схема двуступенчатого деэмульгирования и выделения жира из отработанной воды, а также баланс составляющих приведены на рис. 37.

Исходная смесь, состоящая из жира (1,0% при часовой производительности 81,0 кг/ч жира), белковой ткани (около 0,3%) и незначительного количества мелких кусочков кости, центробежным насосом 1 подается по трубопроводу а в гидроциклоны 5 I ступени (в ГМУ-2000 установлено по два параллельно работающих гидроциклона диаметром 100 мм в обеих ступенях деэмульгаторов; конструкция гидроциклонов приведена на рис. 4). Гидроциклоны установлены непосредственно над карманом отстойника 3 непрерывного действия.

Из верхних патрубков гидроциклонов выходит обогащенная жиром (1,5% при часовой производительности 72,9 кг/ч жира) и очищенная от белковой ткани и кости смесь в количестве 4,86 м³/ч и подается по трубопроводу б в отстойник, где с помощью специального скребкового транспортера 4 жиромасса снимается с зеркала отстойника и по трубопроводу в в количестве 45,8 кг/ч жира направляется в плавитель. Продукт, выходящий из нижних отводных отверстий гидроциклонов по трубке г в количестве 3,24 м³/ч и состоящий из жира (0,25% при часовой производительности 8,1 кг/ч жира), белковой ткани и кусочков кости, поступает непосредственно в отстойник.

На дне отстойника вдоль его продольной оси расположен шнек 2 с затвором, назначением которых является выгрузка белковой ткани и кусочков кости, осевших на дно отстойника, в промывной барабан.

Для регулирования уровня разделяемой смеси в отводящем патрубке отстойника устанавливается заслонка — шибер 6.

Выходящая из I ступени деэмульгатора частично обезжиренная вода (0,44% жира при часовой производительности 35,2 кг/ч жира) в количестве 8,0 м³/ч центробежным насосом 11 подается на второй деэмульгатор, работающий аналогично первому.

Из верхних патрубков второй пары гидроциклонов по трубопроводу д выходит смесь в количестве 4,8 м³/ч (0,67% жира при часовой производительности 31,95 кг/ч жира) и поступает на второй отстойник 10. Скребковый транспортер 9 снимает жиромассу в количестве 19,6 кг/ч жира и направляет ее в плавитель по трубопроводу е.

Из нижних отводных отверстий гидроциклонов по трубке ж непосредственно в карман второго отстойника смесь поступает в количестве 3,2 м³/ч (0,1% жира при часовой производительности 3,25 кг/ч жира) с незначительным количеством белковой ткани и кусочков кости.

Выходящая из патрубка 7 вода (0,195% жира при часовой производительности 15,6 кг/ч жира) по трубопроводу з направ-

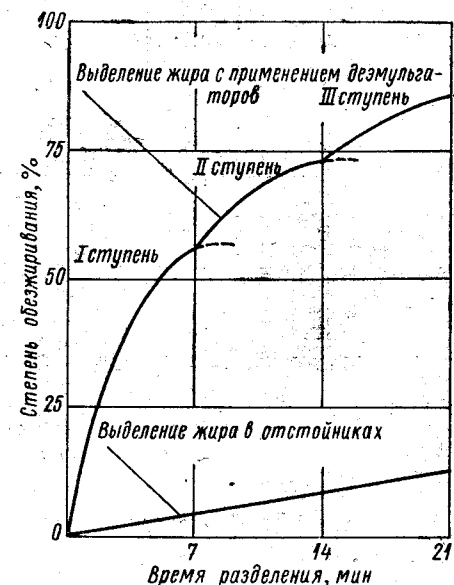


Рис. 38. Степень обезжиривания рабочей воды в гидромеханической установке при многоступенчатом деэмульгировании

ляется на рециркуляцию в гидромеханическую машину (см. рис. 36).

Исследование комплексного процесса разделения, деэмульгирования и отстаивания показывает, что каждая ступень деэмульгаторов обеспечивает быстрое (до 7 мин) выделение 50—55% всего содержащегося в воде жира (рис. 38), поэтому необходимо многоступенчатое обезжиривание.

Выход товарного жира во многом зависит от содержания его в холодной воде, сбрасываемой в канализацию.

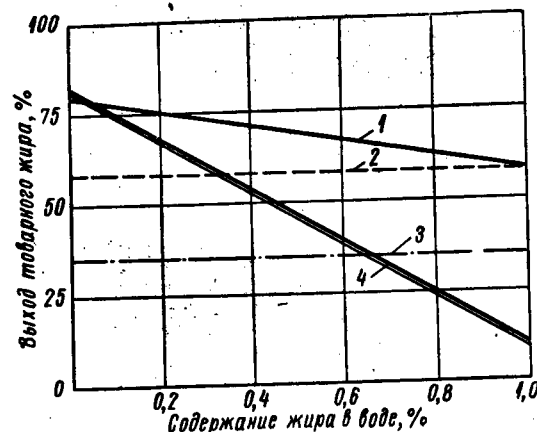


Рис. 39. Зависимость выхода товарного жира от содержания его в воде, сбрасываемой в канализацию:

На рис. 39 кривые 1 и 2 показывают зависимость при извлечении жира из дробленых эпифизов для установки ГМУ-2000 и по нормам выпотки в котлах, а кривые 3 и 4 — при извлечении из рядовой говяжьей кости по нормам выпотки в котлах и для установки ГМУ-2000.

Из рис. 39 видно, что уже при содержании жира в рабочей воде 0,4% (экстракция из кости — дробленые эпифизы) и 0,6% (экстракция из рядовой кости) метод

гидромеханической экстракции теряет свои преимущества по количеству выхода товарного жира по сравнению с методом гидротермической экстракции.

Применение деэмульгаторов ускорило более чем в 40 раз разделение водожировой смеси и уменьшило во столько же раз емкость статических разделителей.

Минимальное содержание жира в отходящей рабочей воде в эксплуатируемых установках с двуступенчатым разделением при правильной отладке режима 0,15—0,20%, что более чем в три раза меньше, чем в импульсной установке Чейна (Англия).

Кроме того, применение гидроциклонов полностью исключило ручной труд по съему жиромассы с поверхности отстойника и улучшило качественные показатели продукта из-за уменьшения времени контакта жиромассы с воздухом и металлом. Значительно улучшилась работа канализационной сети, работа жиропесколовки и очистных сооружений мясокомбината.

Использование гидроциклонов дало возможность создать непрерывный процесс выделения жира из воды и полностью его автоматизировать.

22. ГИДРОЦИКЛОНЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОСТНОГО КЛЕЯ

В 1964 г. на Ленинградском клеевом заводе автором была испытана экспериментальная полупроизводственная гидромеханическая установка для обезжиривания сборной кости при производстве клея. Для отделения жира из отработанной воды в эту установку были последовательно включены конический гидроциклон диаметром 90 мм, конструктивно аналогичный гидроциклону, приведенному на рис. 4, и мультициклон (см. рис. 9).

Данные по результатам обезжиривания, полученные при испытании конического гидроциклона, полностью совпали с результатами работы конических гидроциклонов, работающих на Ленинградском мясокомбинате им. С. М. Кирова.

Результаты испытаний мультициклона (табл. 13) показали, что его производительность возрастает пропорционально корню квадратному из давления питания (аналогично коническому гидроциклону), причем производительность по нижнему продукту остается практически постоянной после достижения давления питания 0,5 кг/см^2 .

Таблица 13

Результаты испытаний мультициклона

Давление питания в кг/см^2	Производительность в $\text{м}^3/\text{ч}$			Содержание жира в %		Степень обогащения	Расход электроэнергии в $\text{квт} \cdot \text{ч}$
	по верхнему продукту	по нижнему продукту	общая	в верхнем продукте	в нижнем продукте		
0,5	0,90	0,13	1,03	—	—	—	0,9
1,0	1,29	0,16	1,45	1,75	1,00	1,75	0,9
1,5	1,60	0,18	1,78	1,25	0,75	1,67	0,9
2,0	1,87	0,19	2,06	0,85	0,65	1,31	1,0
2,1	1,92	0,18	2,10	0,75	0,15	5,00	1,1

Примечание. Исходный продукт — вода + жир; диаметр верхнего отводного отверстия микроциклона — 6,0 мм; диаметр нижнего отводного отверстия микроциклона — 4,5 мм; число микроциклонов — 8 шт.

Максимальная степень обогащения наблюдалась при давлении питания 2,1 кг/см^2 , производительность в этом случае на 1 микроциклон составила 0,26 $\text{м}^3/\text{ч}$, а остаточное содержание жира в воде — 0,15%.

23. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОЦИКЛОНОВ В ДРУГИХ ОТРАСЛЯХ МЯСО-МОЛОЧНОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Применение гидроциклонов в мясо-молочной промышленности

Положительные результаты использования гидроциклонов в производстве пищевых жиров и костного клея подтверждают возможность применения их в других областях мясной промышленности, в частности для ускорения процесса выделения жира из сточных вод производственных цехов, а также автоматизации указанных процессов.

Проведенные в 1960—1961 гг. две серии опытов подтвердили возможность использования гидроциклонов на жиропескостойке для отделения осадка и выделения жира из сточных вод, уходящих на очистные сооружения.

На рис. 40 предлагается непрерывнопоточная аппаратно-технологическая схема очистки и обезжиривания сточных вод.

Работа происходит следующим образом. Сточные воды по трубе диаметром 600 мм поступают в канал 1, в котором установлены механическая решетка 2 с прозором 60 мм и решетка 4 с прозором 16 мм. Чистка решеток механизирована и производится грабельными аппаратами, которые сбрасывают загрязнения на транспортер 3, отводящий их в бочки. Далее сточные воды поступают на центробежные насосы 5, находящиеся под заливом, которыми подаются на гидроциклоны 6. Ввиду того, что поступление сточных вод на гидроциклоны непостоянно и колеблется в значительных пределах ($0,9—2,8 \text{ м}^3/\text{сек}$), предусматривается автоматическое регулирование гидроциклонов. Оно осуществляется с помощью электронных сигнализаторов уровня типа ЭСУ-1, датчики которых устанавливаются в канале входа сточной воды.

Таким образом, при максимальном поступлении сточной воды будут работать три гидроциклона, а при минимальном — один. Разжиженный осадок (с содержанием воды до 1,5% от исходного количества сточной воды) из нижнего слива гидроциклона самотеком по трубе диаметром 200 мм поступает в бункер 7 для отстаивания шлама. При этом избыток воды по переливному трубопроводу сливается в канал 1 сточной воды, а уплотненный шлам выгружается в автомашины или бочки (количество шлама около 3 т/сутки).

Очищенные от шлама и обогащенные жиром сточные воды из верхнего сливного патрубка поступают в жиропескостойку 8, где происходит их отстаивание. Следует иметь в виду, что смесь жира и воды, прошедшая через гидроциклон, отстаивается в восемь раз быстрее, чем обычная смесь. Поэтому обогащение смеси жиром в гидроциклонах и более эффективное отстаивание ее в жиропескостойке позволяют достигнуть обезжиривания сточной воды,

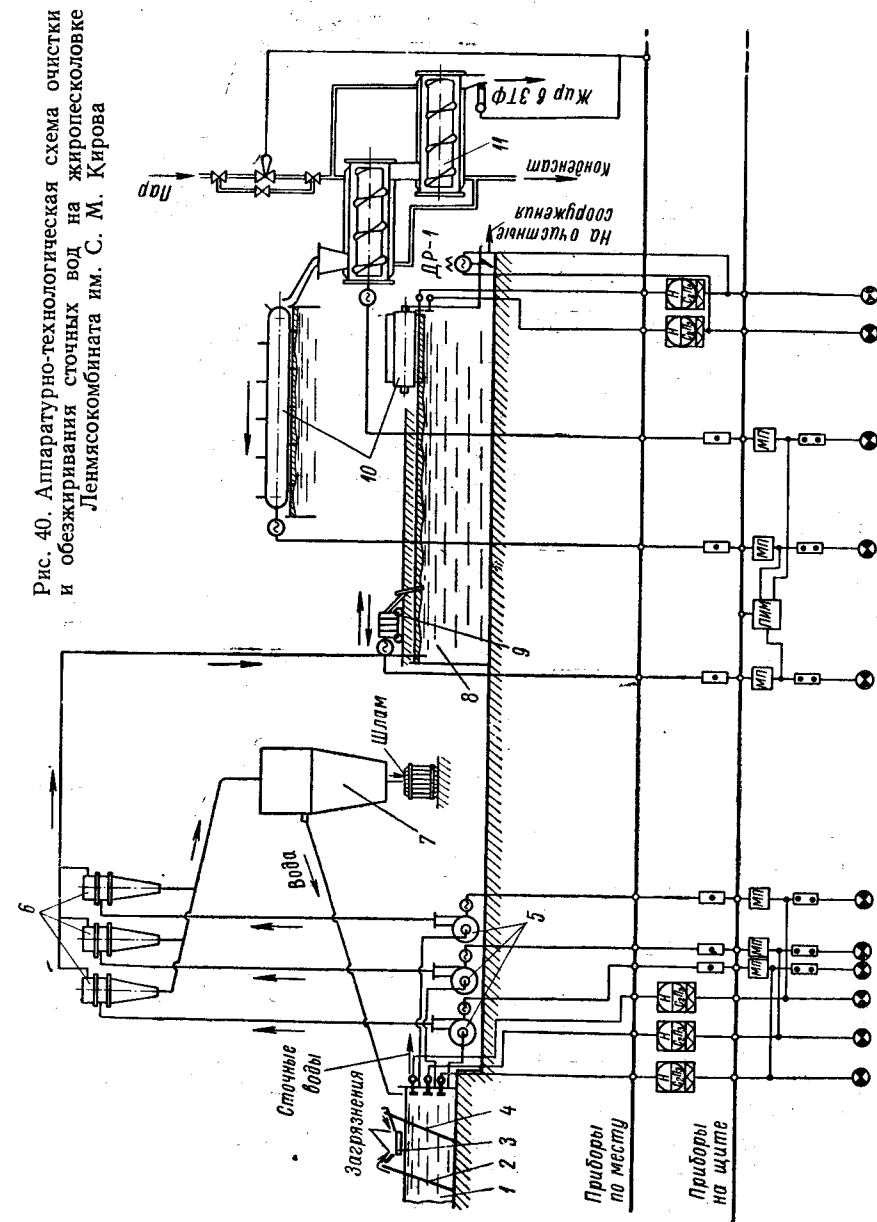


Рис. 40. Аппаратно-технологическая схема очистки и обезжиривания сточных вод на жиропескостойке Ленмясокомбината им. С. М. Кирова

уходящей на очистные сооружения, до остаточного содержания жира 40 мг/л. (В существующей схеме содержание жира в сточной воде составляет в среднем 321 мг/л.) После отстаивания в жиропескостовке всплывшая на поверхность жиромасса подгребается самодвижущейся тележкой 9 к скребковому транспортеру 10, который снимает ее с зеркала отстойника и подает на плавление в двухсекционный плавитель 11.

Для эффективной работы скребкового транспортера уровень воды в жиропескостовке во время его работы поддерживается в пределах $300,0 \pm 2,0$ см с помощью двух электронных сигнализаторов уровня ЭСУ-1 и моторного исполнительного механизма ДР-1. Совместная работа самодвижущейся тележки, скребкового транспортера и двухсекционного плавителя повторяется периодически примерно через 2 ч. При необходимости этот период времени может быть изменен при помощи программного исполнительного механизма (ПИМ), который управляет указанным выше оборудованием. Вышедший из плавителя жир с небольшим содержанием воды разливается в бочки и направляется на завод технических фабрикатов (ЗТФ). Установка сепараторов для отделения жира от воды нецелесообразна из-за незначительного количества получаемого жира (около 200 кг/ч).

Внедрение предлагаемой аппаратурно-технологической схемы очистки и обезжиривания сточных вод позволит:

а) значительно увеличить количество жира, улавливаемого из сточных вод на жиропескостовке (примерно на 40%);

б) сократить количество обслуживающего персонала до двух человек в смену и облегчить их труд;

в) уменьшить количество загрязнений (шлам, каньга и т. п.), поступающих на очистные сооружения;

г) улучшить работу очистных сооружений по обезвреживанию сточных вод;

д) создать непрерывнопоточный процесс обезжиривания и очистки сточных вод, легко поддающийся автоматизации.

Возможны и другие области применения гидроциклонов в мясной промышленности; они могут быть использованы для регенерации пищевых и тузлучных рассолов. Применяемая в настоящее время частичная очистка рассола путем отстаивания и фильтрования через тканевый фильтр не обеспечивает в должной степени освобождение раствора от загрязнений. Отстаивание обычно продолжается не менее 1 ч, причем процесс периодический.

Растворы хлористого кальция и натрия, применяемые в холодильных установках, быстро обогащаются продуктами коррозии, состоящие главным образом из аморфного, высокодисперсного, не растворимого в указанных растворах гидрата окиси железа. Накопление в рассолах продуктов коррозии и отложение их на внутренней поверхности трубопроводов приводит к значитель-

ному повышению теплового сопротивления поверхностей охлаждающих аппаратов.

Очистка холодильных рассолов от продуктов коррозии является актуальной задачей, которую с успехом можно решить, используя гидроциклоны.

В молочной промышленности гидроциклоны могут быть использованы в технологических линиях производства белковых молочных продуктов для нормализации молока по жирности и очистке его от механических примесей.

В 1958 г. в Ленинградском институте «Механобр» совместно с автором были проведены опыты по определению возможности сепарирования молока на гидроциклонах. Опыты проводились на гидроциклоне конструкции института «Механобр» диаметром 10 мм, с углом конуса 20° и давлением питания на входе $7,5 \text{ кг/см}^2$. Исходное молоко имело жирность 3,8%. После первого пропускания через гидроциклон содержание жира в нижнем продукте составляло 3,6%, а в верхнем — 6,0%. Последующее гидроциклонирование верхнего продукта повышало жирность всего на 0,5%. Таким образом, сепарирование молока на гидроциклонах практически нецелесообразно.

В 1962 г. автором были проведены опыты для определения возможности использования гидроциклонов в производстве казеина. Результаты опытов показали, что гидроциклоны с успехом могут быть включены в технологическую линию производства казеина для непрерывного отделения сыворотки от зерна и предварительного обезвоживания его.

Применение гидроциклонов в пищевой промышленности

Гидроциклоны можно использовать в пищевой промышленности для разделения суспензий.

В маслодобывающей промышленности при получении пальмового масла гидроциклоны используются для отделения ядра от оболочки орехов.

Возможность применения гидроциклонов для очистки мисцеллы при производстве растительных масел подтверждается опытами, проведенными во Всесоюзном научно-исследовательском институте жиров. Использование гидроциклонов в этом случае дает возможность проводить процесс непрерывным способом, значительно снизить расход бензина, повысить безопасность работы и производительность труда.

В настоящее время Всесоюзный научно-исследовательский институт жиров закончил разработку установки с использованием гидроциклонов для удаления органических и минеральных примесей из соевых семян, а также для мойки семян сои в процессе получения пищевой соевой муки. Производительность установки

150 т семян сои в сутки; съём органического и минерального сора 85—90 %.

Гидроциклоны могут быть использованы вместо вибрационных сит при отделении из сырых масел крупных частиц мезги, а также для отделения отбелных земель при гидрировании жиров.

В крахмало-паточной промышленности гидроциклоны используются в технологических схемах переработки картофеля в крахмал для выделения соковой воды из крахмального молока.

Ближайшей перспективой развития мультициклонов при производстве крахмала является внедрение комплексных станций мультициклонов, предназначенных для выделения соковой воды из крахмального молока и одновременно для его размывки.

В кукурузо-крахмальном производстве, как показала практика, использование гидроциклонов для отцеживания кукурузной каши перед жерновами позволило поддерживать оптимальную консистенцию ее и уменьшить количество действующих ситовых аппаратов, обслуживание которых значительно сложнее, чем гидроциклонов.

Гидроциклоны также могут быть применены для выделения из кукурузного зерна различных тяжелых и легких примесей (гальки, металлических примесей, остатков кочерыжки).

В паточном и глюкозном производстве следует использовать мультициклоны для замены фильтр-прессов.

В виноделии возможна замена гидроциклонами фильтров для отделения муты от вина и сепарирующих центрифуг для разделения тонких суспензий с низкой концентрацией твердой фазы, к которым относятся сусло и вино. И, наконец, гидроциклоны больших размеров можно применить для отделения кожицы винограда от сусла. Схемы разделения указанных суспензий могут быть различными в каждом случае.

В витаминном производстве при извлечении каротина из моркови возможна замена гидроциклонами отстойников и фильтр-прессов.

При производстве дрожжей гидроциклоны могут найти применение для выделения дрожжей из бражки, а также для сепарации дрожжевого молока.

При производстве спирта из картофеля гидроциклоны могут заменить отстойники для грязных вод, отходящих из картофельной мойки на поля орошения.

В мыловаренном производстве гидроциклоны могут найти применение для отделения туалетной воды в виде солей жирных кислот (мыла) от подмыльного щелока при производстве туалетного мыла. В настоящее время это производится путем отстаивания этой смеси в течение 24—30 ч.

В производстве хозяйственного мыла при наличии непрерывных процессов мыловарения сепараторы для разделения водной

и жировой фаз после омыливания можно заменить гидроциклонами.

В глицериновом производстве установка гидроциклонов позволит в значительной степени снизить нагрузку на фильтр-прессы, применяемые для отделения примесей.

Применение гидроциклонов в пищевой и мясо-молочной промышленности позволит упростить технологические процессы, заменить громоздкое оборудование компактными установками гидроциклонов, автоматизировать управление и облегчить тяжелый физический труд.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Общие сведения о гидроциклонах	5
1. Современные методы разделения суспензий и область применения гидроциклонов	—
2. Принцип действия гидроциклонов и отличие их от аэроциклонов и центрифуг	9
3. Конструкция гидроциклонов	11
Глава II. Гидродинамические основы и закономерности моделирования гидроциклонов	21
4. Движение жидкости в гидроциклонах и распределение скоростей	—
5. Движение сепарируемой частицы в гидроциклоне	31
6. О воздушном столбе в гидроциклоне	32
7. Закономерности моделирования гидроциклонов	36
Глава III. Основные факторы, влияющие на производительность и процесс разделения фаз в гидроциклонах	38
8. Факторы, влияющие на процесс разделения фаз в гидроциклонах	—
9. Характеристика процесса разделения фаз в гидроциклонах	39
10. Давление и равномерность подачи питания	41
11. Диаметр гидроциклона и высота его цилиндрической части	44
12. Конструкция верхней разгрузочной части	45
13. Форма и размеры входного отверстия	47
14. Диаметры верхнего и нижнего отводных отверстий	50
15. Угол конической части	52
Глава IV. Расчет гидроциклонов	53
16. Определение производительности гидроциклона	—
17. Методика расчета основных размеров гидроциклона	58
Глава V. Эксплуатация гидроциклонов	62
18. Монтаж и наладка гидроциклонов	—
19. Контроль и регулирование работы гидроциклонов	64
20. Расход электроэнергии	66
Глава VI. Опыт применения гидроциклонов и перспективы их использования в пищевой промышленности	67
21. Промышленная установка гидроциклонов для отделения жира из отработанной воды	—
22. Гидроциклоны в производстве костного клея	71
23. Перспективы применения гидроциклонов в других отраслях мясо-молочной и пищевой промышленности	72
Литература	78



Р. Н. ШЕСТОВ

Гидро- циклоны

Депозитно - 2062



ИЗДАТЕЛЬСТВО „МАШИНОСТРОЕНИЕ“
ЛЕНИНГРАД 1967